



Universidad
Carlos III de Madrid

**Departamento de Ingeniería de Sistemas y
Automática**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Industrial

**Diseño e implementación de
sistemas de control aplicados a
un exoesqueleto para la
rehabilitación de la mano**

Autor: Ignacio Santoja Guerrero

Tutor: Mohamed Abderrahim Fichouche



Introducción

Título: Diseño e implementación de sistemas de control aplicados a un exoesqueleto para la rehabilitación de la mano

Autor: Ignacio Santoja Guerrero

Director: Mohamed Abderrahim Fichouche

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Una vez llegado a este momento, solo queda agradecer a todas esas personas que han sabido comprender y ayudar en todo este tiempo lleno de responsabilidad y agobios, pero que han dado como resultado alegrías y satisfacciones inmensas.

A mi padre, porque siempre ha confiado en mí y en mi saber hacer, y siempre me ha dado los medios para poder centrarme en lo que hacía evadiéndome de más responsabilidades.

A mi madre, por aguantar malos humores y días oscuros con buena cara, a la expectativa de que pasen esos momentos.

A mi hermana, porque ella mejor que nadie sabe lo que es y lo que ha sido. Por darme las facilidades que conllevan ser el segundo y por apoyarme en esos días de saturación mental.

A mi novia, por esperar paciente y estar siempre ahí. Por confiar en mis objetivos, aún cuando éstos se han cruzado con los suyos.

A mis amigos, por “olvidarme” durante las épocas de exámenes de todos los años que han tenido que aguantarlo dándome las facilidades que han estado en su mano, y en especial a Jesús por compartir su *know-how* de fotografía.

A Mohamed, mi tutor, por darme la oportunidad de realizar un proyecto a mi modo de ver, interesante, y darme toda la confianza para llevarlo a mi manera y con sus consejos.

A todos ellos ¡GRACIAS!

Resumen

La rehabilitación es un campo que en los últimos años ha evolucionado de manera espectacular ligado a los grandes avances tecnológicos. Sin embargo, no se ha desarrollado de igual forma para la rehabilitación de todas las partes del cuerpo, y es por esto que este proyecto trata de diseñar y construir una alternativa palpable para aquellas personas que por el hecho de tener dañada la mano o los dedos de esta, no pueden acceder a esa mencionada evolución del sector.

Este proyecto tiene como objetivo la construcción de un prototipo de carácter funcional como medio de integración de determinados sistemas de control enfocados a la ayuda y mejora de los ejercicios necesarios para la recuperación de las funciones motoras perdidas.

Para ello, se diseñará y construirá un sistema mecánico de tipo exoesqueleto, que será la interfase entre el paciente y los controles implementados. Estos sistemas de control tendrán como fin último la medida y control de fuerza ejercida por el paciente a la hora de realizar los ejercicios de rehabilitación. Esta idea no es pionera por sí sola, pero sí lo es cuando entra en juego los costes del diseño. Cualquier sistema de este tipo precisa de sensores de fuerza que incrementan sobremanera el precio final del proyecto, por lo que se implementará un sistema de medida completamente autónomo eludiendo la necesidad de incorporar los sensores comentados.

La realización de este proyecto involucra, en general, muchos aspectos propios de la ingeniería, y en particular, de los sistemas de control.

Índice

1	Introducción.....	18
1.1	Marco del proyecto.....	18
1.2	Objetivos	21
1.3	Motivaciones	22
1.4	Organización y fases de desarrollo.....	22
2	Estado de la Técnica	24
2.1	Rehabilitación.....	24
2.2	Sistemas de control.....	29
2.2.1	Técnicas de control.....	30
2.2.2	Control de fuerza.....	34
2.3	Prototipo	34
3	Hardware.....	38
3.1	Placa de desarrollo	39
3.1.1	Generación del modelo del hardware.....	41
3.2	Fuente de alimentación	42
3.3	Driver.....	43
3.4	Freno	46
3.5	Motor	48
3.5.1	Generalidades	48
3.5.2	Función de transferencia del motor.....	51
3.6	Encoder	56

4	Sistemas de Control.....	58
4.1	Introducción	58
4.1.1	Tipos de control.....	60
4.2	Medida de velocidad	62
4.2.1	Ensayo	63
4.3	Medida de posición	66
4.3.1	Ensayo	66
4.4	Control de velocidad	69
4.4.1	Control clásico	69
4.4.2	Cancelación polo-cero	74
4.5	Control de posición	79
4.5.1	Control clásico	79
4.5.2	Cancelación pares polo-cero	83
4.6	Medida de fuerza	87
4.7	Control de fuerza.....	93
4.7.1	Control clásico	93
4.7.2	Cancelación pares polo-cero	98
4.7.3	Lógica difusa	102
4.7.4	Integración posición y fuerza	105
5	Prototipo	110
5.1	Exoesqueleto	111
5.2	Tendón	115
5.3	Base sujeción	117
5.4	Base soporte.....	117
5.5	Tambor	118
5.5.1	Tambor	120
5.5.2	Apoyo	121
5.6	Fotos	122
6	Presupuesto.....	130
6.1	Materiales	130
6.2	Hardware.....	131
6.3	Software	131
6.4	Diseño y documentación.....	131
6.5	Costes totales	132

Introducción

7	Conclusiones.....	134
7.1	Conclusiones.....	134
7.2	Trabajos futuros	137
7.2.1	Ampliación del proyecto	137
7.2.2	Parametrización del exoesqueleto.....	138
7.2.3	Repetición de trayectorias	138
7.2.4	Aplicación a la realidad virtual	141
	Bibliografía.....	142
	Anexos.....	144
A1	Instalación QuaRC	144
A1.1	Requerimientos de software.....	144
A1.2	Requerimientos de hardware	145
A1.3	Instalación	146
A2	Impresora 3D.....	148
A2.1	OpenScad	148
A2.2	Impresión	151
A3	Caracterización del motor de corriente continua	152
A4	Datasheet Hardware	154

Lista de Figuras

Figura 1.1 Robot da Vinci.	19
Figura 1.2 Exoesqueleto para la mano.	21
Figura 2.1 Movimientos habituales de rehabilitación de los dedos.....	25
Figura 2.2 Movimientos habituales de rehabilitación de la mano.....	26
Figura 2.3 Proyectos existentes específicos para dedos.	27
Figura 2.4 Exoskeleton Hand Robotic Training Device.....	27
Figura 2.5 Rice Wrist.....	28
Figura 2.6 Monitorización sesión de rehabilitación.	29
Figura 2.7 Métodos de sintonización de PID.....	32
Figura 2.8 Acoplamiento de los tendones del dedo.....	35
Figura 2.9 Sesión con HandCARE.....	36
Figura 2.10 Aplicaciones de realidad virtual y hápticos.	36
Figura 3.1 Esquema general del sistema completo.....	38
Figura 3.2 Placa de desarrollo Q8 de Quanser	39
Figura 3.3 Librerías de QuaRC en Matlab.....	41
Figura 3.4 Bornas fuente de alimentación	42
Figura 3.5 Regresión ganancia driver	44
Figura 3.6 Plano conexiones driver	45
Figura 3.7 Conexiones cable RS-232.....	45
Figura 3.8 Esquema divisor resistivo para alimentación del freno	46
Figura 3.9 Esquema motor corriente continua.	48

Figura 3.10 Flujo magnético en el motor	49
Figura 3.11 Par de fuerzas generado según regla de la mano derecha.	49
Figura 3.12 Par de fuerzas generado según el ángulo.	49
Figura 3.13 Efecto de las delgas del colector.	50
Figura 3.14 Modelo eléctrico de un motor de corriente continua.	50
Figura 3.15 Respuesta real del sistema completo ante entrada escalón.....	52
Figura 3.16 Respuesta experimental simulada (rojo) y teórica simulada (azul).	53
Figura 3.17 Respuesta real driver ante entrada escalón 1V.	53
Figura 3.18 Respuesta teórica simulada sistema completo.	54
Figura 3.19 Esquema funcionamiento encoder.	56
Figura 3.20 Señales encoder	56
Figura 3.21 A la izquierda, motor+encoder, a la derecha, esquema de conexiones	57
Figura 4.1 Esquema clásico de un sistema de control.....	59
Figura 4.2 Esquema de medida de velocidad a partir del encoder.	62
Figura 4.3 Respuesta teórica simulada sistema completo.	63
Figura 4.4 Respuesta del motor ante entrada escalón unitario.....	64
Figura 4.5 Respuesta del motor ante pulsos de 1V y 0,2Hz.	65
Figura 4.6 Esquema de la medida de posición del eje del motor.	66
Figura 4.7 Respuesta en posición del sistema real ante entrada escalón unitario.	67
Figura 4.8 Respuesta en posición simulada del sistema ante escalón unitario.	67
Figura 4.9 Esquema control clásico de velocidad con f.d.t. teórica.	69
Figura 4.10 Respuesta velocidad método clásico (teórica).	70
Figura 4.11 Esquema control clásico de velocidad con f.d.t. experimental.	71
Figura 4.12 Respuesta velocidad método clásico (experimental).	71
Figura 4.13 Esquema de control clásico real de velocidad con regulador PID.....	72
Figura 4.14 Respuesta de velocidad real (Método clásico).	73
Figura 4.15 Detalle sobreoscilación respuesta real.....	73
Figura 4.16 Esquema control de velocidad por cancelación polo-cero con f.d.t. teórica..	74
Figura 4.17 Respuesta velocidad método cancelaciones (teórica).	75
Figura 4.18 Esquema control velocidad por cancelaciones (f.d.t. experimental).	76
Figura 4.19 Respuesta velocidad método cancelaciones (experimental).	77
Figura 4.20 Esquema de control real de velocidad por cancelación.....	77
Figura 4.21 Respuesta real en velocidad (cancelación polo-cero).	78
Figura 4.22 Esquema control clásico de posición con f.d.t. teórica.	79

Figura 4.23 Respuesta posición método cancelaciones (teórica).	80
Figura 4.24 Esquema control clásico de posición con f.d.t. experimental.	81
Figura 4.25 Respuesta posición método cancelaciones (experimental).	82
Figura 4.26 Esquema de control real de posición por método clásico.	82
Figura 4.27 Respuesta real en velocidad (método clásico).	83
Figura 4.28 Esquema control de posición por cancelación polo-cero con f.d.t. teórica.	84
Figura 4.29 Respuesta posición método clásico (teórica).	84
Figura 4.30 Esquema control posición por cancelación polo-cero (f.d.t. experimental). ..	85
Figura 4.31 Respuesta posición método clásico (experimental).	85
Figura 4.32 Esquema de control real de posición por cancelación.	86
Figura 4.33 Respuesta real en posición (cancelación polo-cero).	86
Figura 4.34 Modelo eléctrico, motor DC de imanes permanentes.	87
Figura 4.35 Medida de corriente consumida por el motor (directa).	88
Figura 4.36 Medida de corriente consumida por el motor (con LPF).	89
Figura 4.37 Simulación f.d.t. calculada experimentalmente (motor+driver+filtro).	89
Figura 4.38 Esquema de medida de corriente, par y fuerza.	91
Figura 4.39 Medida de corriente consumida por el motor (Kalman).	92
Figura 4.40 Esquema control de fuerza con f.d.t. experimental (control clásico).	93
Figura 4.41 Bloque conversor I-F.	94
Figura 4.42 Respuesta simulada de fuerza (control clásico).	95
Figura 4.43 Esquema real control de fuerza (control clásico).	95
Figura 4.44 Tensión de entrada al motor (método clásico).	96
Figura 4.45 Control de corriente (método clásico).	96
Figura 4.46 Control de par (método clásico).	97
Figura 4.47 Control de fuerza (método clásico).	97
Figura 4.48 Esquema control de fuerza con f.d.t. experimental (cancelaciones).	98
Figura 4.49 Respuesta control de fuerza simulada (cancelaciones).	99
Figura 4.50 Esquema real control de fuerza (cancelaciones).	99
Figura 4.51 Tensión de entrada al motor (cancelaciones).	100
Figura 4.52 Control de corriente (cancelaciones).	100
Figura 4.53 Control de par (cancelaciones).	101
Figura 4.54 Control de fuerza (cancelaciones).	101
Figura 4.55 Esquema control de fuerza (<i>fuzzy</i>).	102
Figura 4.56 Respuesta fuerza (<i>fuzzy</i>).	104

Figura 4.57 Respuesta posición (fuzzy).	104
Figura 4.58 Entrada de tensión a la planta (fuzzy).	105
Figura 4.59 Esquema general control integrado (posición-fuerza).	106
Figura 4.60 Esquema control de fuerza-posición simultáneo.	107
Figura 4.61 Respuesta fuerza (posición-fuerza).	107
Figura 4.62 Tensión entrada a la planta (posición-fuerza).	108
Figura 4.63 Respuesta posición (posición-fuerza).	108
Figura 5.1 Prototipo HEXORR.	111
Figura 5.2 Prototipo CyberGlove.	112
Figura 5.3 Distribución de tendones en la mano.	112
Figura 5.4 Corte sagital de un dedo.	112
Figura 5.5 Boceto exoesqueleto rígido.	113
Figura 5.6 Boceto exoesqueleto flexible.	114
Figura 5.7 Pieza punta del dedo.	115
Figura 5.8 Base sujeción.	117
Figura 5.9 Detalle taco de goma.	117
Figura 5.10 Boceto base soporte.	118
Figura 5.11 Base soporte.	118
Figura 5.12 Esquema tambor con soportes.	119
Figura 5.13 Boceto diseño seleccionado.	120
Figura 5.14 Despiece del tambor.	121
Figura 5.15 Esquema ensamblado del rodamiento.	121
Figura 5.16 Sistema completo sin PC.	122
Figura 5.17 Base soporte con tapa abatida.	122
Figura 5.18 Placa de conexiones Q4 de Quanser.	123
Figura 5.19 Alzado base soporte abierta.	123
Figura 5.20 Fuente de alimentación s82J-10024 de OMRON.	124
Figura 5.21 Tarjeta PCI Q4 de Quanser integrada en el PC.	124
Figura 5.22 Sistema de anclaje del motor y acoplamiento del tambor.	125
Figura 5.23 Conexión placa Q4 (izda.) y alzado tambor con soporte (dcha.).	125
Figura 5.24 Juego de piezas fabricadas con la impresora 3D.	126
Figura 5.25 Base sujeción con cintas de velcro.	126
Figura 5.26 Detalle del guiado del hilo de sedal.	127
Figura 5.27 Parte del exoesqueleto correspondiente al dedo.	127

Figura 5.28 Exoesqueleto durante la flexión del dedo.....	128
Figura 5.29 Exoesqueleto durante la extensión de los dedos.....	128
Figura 5.30 Perfil del exoesqueleto completo con tubo guía.....	129
Figura 5.31 Panorámica del prototipo.....	129
Figura 7.1 Posicionamiento espacial del Wiimote y cinta reflectante.	139
Figura 7.2 Wiimote y diodos led en la misma dirección y sentido.....	139
Figura 7.3 Apariencia programa Wii Sensor.....	140
Figura 7.4 Esquema para monitorizar la salida de los sensores.....	140
Figura A.1 Cuadro resumen compatibilidad.....	145
Figura A.2 Pantalla de instalación.	146
Figura A.3 Pantalla de instalación <i>Feature Selection</i>	147
Figura A.4 Librería QuaRC de Simulink.	147
Figura A.5 Formas geométricas planas sencillas.	148
Figura A.6 Ejemplo de unión para generar geometrías.	149
Figura A.7 Ejemplo de diferencia para generar geometrías.....	149
Figura A.8 Código de figuras diseñadas.....	150
Figura A.9 Apariencia del programa ReplicatorG.....	151
Figura A.10 Pieza sobre base raft.	151
Figura A.11 Modelo equivalente motor DC.....	152
Figura A.12 Gráfico intensidad-par del motor.....	153

1 Introducción

1.1 Marco del proyecto

A menudo, las personas vivimos situaciones peligrosas en ámbitos como el laboral, de ocio, o cualquier otro, que puede llevarnos a sufrir accidentes o daños de los que es complicado recuperarse. Para paliar esas situaciones, se hace uso de la rehabilitación, que permite mejorar esas dolencias con objeto de, al menos, ser autosuficientes e independientes de terceras personas para seguir una vida lo más normal posible. En función del daño sufrido, esto llegará a conseguirse o no.

Los problemas más comunes que llevan a la necesidad de rehabilitar una parte del cuerpo son:

- Accidentes. Los accidentes de tráfico, o los accidentes laborales tienen lugar con mucha frecuencia. Pueden ir desde simples torceduras de tobillo hasta fracturas o lesiones más severas como las medulares (lesiones que reducen la movilidad de forma permanente o irreversible).
- Enfermedades articulares. Son entre otras la artritis, o degenerativas como la esclerosis múltiple que ataca también a la capacidad motora.
- Otras enfermedades. Por ejemplo los infartos, derrames cerebrales, ataques, apoplejías, paraplejias y otras que llevan al paciente, en el mejor de los casos, a ver reducida parcial o totalmente su movilidad.

Todos estos casos, y otros menos frecuentes, hacen que la figura de un fisioterapeuta sea imprescindible en la actualidad. Éste tratará de ayudar al paciente a recuperar el movimiento en la medida de lo posible y sus tratamientos se basarán en encontrar los ejercicios físicos adecuados a cada caso. Otra parte, y probablemente la más importante de la recuperación, es la fuerza de voluntad del enfermo y su esperanza de recuperar las funciones motoras que ha

perdido. En determinados casos es éste el único motor de superación, ya que a veces las posibilidades de recuperar un ápice de movilidad son ínfimas.

Tradicionalmente la rehabilitación se ha basado en la experiencia adquirida durante muchos años y el bien hacer del paciente a la hora de explicar su dolencia y su posterior mejoría, pero en ningún caso se ha tenido la oportunidad de cuantificar esa recuperación sino que era el paciente el que la manifestaba.

En los últimos años hemos visto como cada vez más proyectos tecnológicos orientados a la rehabilitación han visto la luz y han tenido una buena acogida en los hospitales, donde se ha experimentado y comprobado la eficacia de muchos de ellos. Este hecho da una motivación adicional a aquellos pacientes que hasta hace poco se veían resignados a realizar terapias comunes con previsiones poco halagüeñas.

Las ventajas que ofrece la ingeniería aplicada al campo de la medicina son indiscutibles. Un ejemplo claro de esta circunstancia es el robot “da Vinci” (Figura 1.1), capaz de realizar operaciones delicadas siendo manipulado por un cirujano. Este tipo de aparatos tecnológicos están presentes en cualquier centro médico en países desarrollados y cada vez más en países en vías de desarrollo, y la rehabilitación no es una excepción. Como es lógico, el trabajo en equipo entre ingenieros y médicos ha de ser constante. El especialista en rehabilitación ha de ser la cabeza que dicte cómo ayudar al paciente y qué es necesario para ello, y el ingeniero será el responsable de intentar satisfacer las peticiones realizadas mediante el diseño e implementación del dispositivo necesario.



Figura 1.1 Robot da Vinci.

La dupla robótica-rehabilitación es una magnífica noticia para los pacientes y por supuesto para la comunidad científica y la fisioterapéutica, ya que el conocimiento de unos, junto con las herramientas de otros permite la elaboración de proyectos muy ambiciosos y con un claro

Introducción

beneficio en lo que a salud se refiere. Uno de los factores que ha posibilitado los dispositivos rehabilitadores es la miniaturización de todos los componentes eléctricos y electrónicos como motores y sistemas de control, ya que hace unos años era impensable el diseño de una máquina acoplada a una parte del cuerpo humano y sin embargo, actualmente son habituales.

La rehabilitación a menudo se convierte en el entrenamiento de una articulación mediante ejercicios repetitivos, y es ahí donde los robots pueden aportar mucho. Tradicionalmente, las mejoras que un paciente podía experimentar se limitaban a las producidas por un elenco de ejercicios físicos en un gimnasio o bien asistidos por un fisioterapeuta. Las nuevas tecnologías nos dan la posibilidad de mejorar esos ejercicios y de idear otros nuevos hasta ahora inimaginables. Pero no solo nos permite esto, sino que somos capaces de monitorizar movimientos, constantes médicas, y extraer otra información relevante para el especialista médico que supervise la terapia. Ésta es la gran ventaja de la ingeniería en el mundo de la sanidad, la inclusión de sensores de todo tipo que nos permite cuantificar de manera clara la mejoría del paciente y los avances que se consiguen en sus capacidades motoras sesión tras sesión. También se han obtenido otras mejoras importantes, como es la rentabilidad y el abanico de posibilidades que abre un dispositivo de menores dimensiones. Podría convertirse en portátil. Por otro lado, se mejora la repetitividad y se reduce la dependencia de un especialista.

Al margen del aspecto físico de la recuperación, los pacientes que realizan estos ejercicios sufren al hacerlos, y frecuentemente se convierte en algo doloroso y frustrante. Por ello, mediante dispositivos multimedia o interfaces simples podemos idear nuevos ejercicios basados en juegos simples para hacer más amena y divertida la terapia para el paciente, reduciendo así su sufrimiento y logrando mejores resultados al final de la terapia.

En la actualidad existen más posibilidades de mejora para pacientes con este tipo de discapacidad, aunque a menudo los tratamientos con sistemas robóticos requieren un cierto poder adquisitivo que priva a gran parte de la población afectada. Es algo que lamentablemente no podemos encontrar en cualquier hospital al que vayamos, aunque las máquinas más modestas ya están muy extendidas. Es por ello, que existe una clara tendencia de estas tecnologías hacia la reducción de costes para hacerlo accesible a toda la sociedad.

Lo deseable sería que en un futuro lo más cercano posible, todo daño en cualquier parte del cuerpo pueda ser remitida por completo. Desgraciadamente, los accidentes son algo imprevisible que no podemos eliminar de nuestras vidas, por lo que se hace imprescindible que la rehabilitación sea más eficiente que en la actualidad para lograr así una mayor calidad de vida de cara al futuro.

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es el diseño de un exoesqueleto sencillo orientado a la rehabilitación de la mano de personas que han podido ver mermada su movilidad a causa de alguna enfermedad o accidente.

1.2 Objetivos

Como ya se ha explicado con anterioridad, el objetivo de este proyecto es entonces el diseño de un exoesqueleto para la rehabilitación de la mano que albergue un sistema de control de movimiento capaz de asistir y resistir el esfuerzo ejercido por el paciente. El sistema tendrá una parte mecánica que será accionada mediante tendones, con diferentes motores.

La idea principal del proyecto es la de diseñar un prototipo para poder rehabilitar todos los dedos de una mano. Sin embargo, debido al alcance del proyecto, se establece como fin el prototipo para un único dedo, ya que el sistema completo de la mano consistiría únicamente en la integración de los prototipos para cada dedo.

Se pueden establecer dos partes muy diferenciadas en el diseño:

- Mecánica. Construcción del sistema físico compuesto por exoesqueleto, base de sujeción del brazo y base del Hardware, similar al mostrado en la Figura 1.2.
- Control. Diseño de los diferentes lazos de control de velocidad, posición y fuerza. Esta parte será el grueso del proyecto.

El objetivo es controlar el movimiento del dedo de manera que se pueda fijar una resistencia que se oponga al movimiento que realiza el paciente, y cuyo valor será ajustable. El enlace de la parte mecánica y el control es el motor, que será el encargado de ajustar las magnitudes necesarias en cada momento y lo hará mediante un tendón conectado al mismo. También se pretende poder asistir al movimiento en caso de que el paciente tenga movilidad demasiado reducida y no sea capaz de mover el dedo sin ayuda externa.

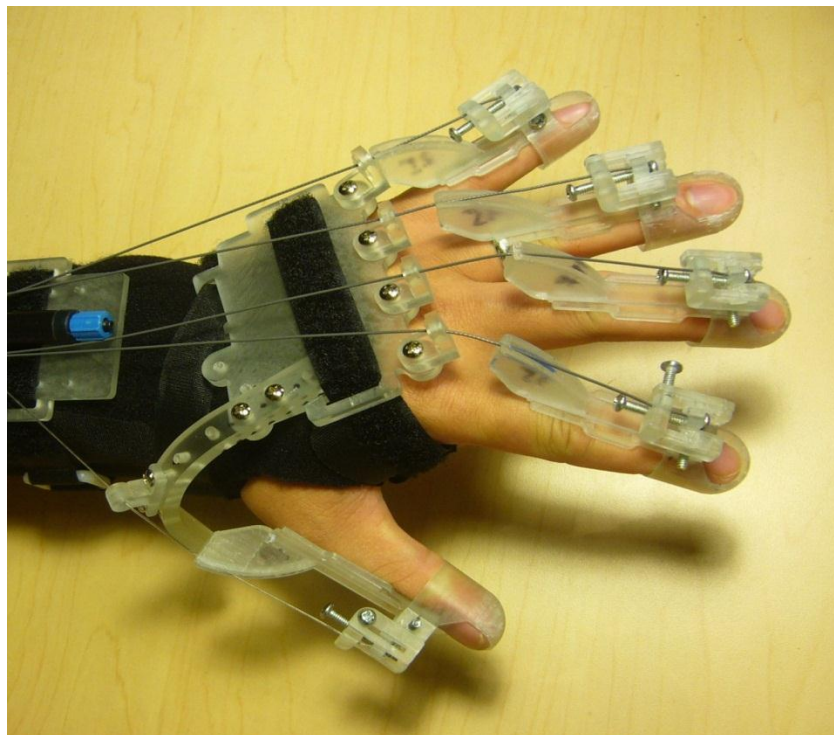


Figura 1.2 Exoesqueleto para la mano.

Introducción

Para este fin se utilizará una placa comercial de desarrollo junto con un motor de corriente continua y demás dispositivos necesarios para la implementación del sistema. Dicha placa será la encargada de hacer posible la ejecución de los programas que se crearán en un entorno de desarrollo en un ordenador personal.

Como objetivo anexo a lo anterior, se pretende diseñar un *software* que permita la medida de fuerza ejercida por el motor sin ayuda de sensores de fuerza. Uno de los motivos es puramente económico, ya que este tipo de sensores tienen un coste muy elevado. El otro motivo es la complejidad en el montaje de sensores integrados en el propio exoesqueleto, además del aumento de volumen que supone. Parte del proyecto estará dedicado al estudio de esta posibilidad que podría permitir la construcción de un prototipo con un coste considerablemente menor a los que existen actualmente en el mercado.

Estos son los objetivos y especificaciones del proyecto, cuyo estudio y su desarrollo será explicado en los capítulos sucesivos.

1.3 Motivaciones

La rehabilitación es algo que convive con nosotros desde la antigüedad y en la era actual regida por la ciencia y las nuevas tecnologías no se ha avanzado tanto como sería deseable. Por esto es importante y prometedor dedicar tiempo y recursos a la investigación en este campo, ya que ningún ser humano está exento de sufrir un percance o padecer alguna enfermedad que nos haga precisarla.

La idea de poder aplicar los conocimientos de ingeniería a algo tan palpable y útil como un sistema de rehabilitación, es algo que llama especialmente la atención. El saber que algo que se investigue o se diseñe puede llegar a ayudar a otra persona con problemas en su capacidad motora es algo que ilusiona y motiva sobremanera a la hora de elegir y desarrollar este proyecto.

El objetivo del prototipo no es su comercialización pero sí, como todo prototipo, comprobar la viabilidad económica y tecnológica de un equipo de rehabilitación sin sensor de fuerza. En un futuro se espera poder ser mejorado y con el tiempo convertirse en un diseño comercial para quien estuviera interesado.

1.4 Organización y fases de desarrollo

La presente memoria se estructura en diferentes capítulos, cada uno de los cuales explican y profundiza en los diferentes aspectos tratados a lo largo del estudio y desarrollo del trabajo. La memoria consta de nueve capítulos.

Durante el primer capítulo, se plantea el problema a resolver. Se trata de enmarcar el proyecto en un contexto que dé sentido a la realización del mismo. En él se introduce el tema, se plantea la necesidad y las causas por las que se hace el estudio y se exponen las ideas principales y motivaciones que llevan a la elección de éste en detrimento de otros de gran

importancia e interés. Además, se describe la estructura de la memoria y la metodología seguida para la realización del proyecto. Por último, se introduce brevemente la realidad de los sistemas de rehabilitación y su relación con la decisión de afrontar este problema en detrimento de otros.

El capítulo siguiente es el del estado de la técnica. Como su propio nombre indica, se aborda el estado real del sector que enmarca el proyecto. En este caso, se analizan los estados de la técnica en el ámbito de la rehabilitación y de los sistemas de control. Para ello, se hacen referencias a artículos, congresos, y proyectos ya existentes relacionados con este tema.

El tercero, es un capítulo que proporciona la información necesaria sobre cada uno de los dispositivos utilizados en el proyecto. Estos dispositivos van desde la placa de desarrollo donde se ejecutan los diseños de control, hasta las características de funcionamiento del motor.

El cuarto capítulo es la parte esencial del proyecto. En él se explican todo el estudio previo al diseño de los controles del sistema. Los controles serán explicados detalladamente apoyándose en ecuaciones y demostraciones que faciliten la comprensión del tema.

El siguiente capítulo, trata el diseño y construcción del prototipo donde se aplicarán los sistemas de control implementados en el capítulo anterior. También se detallarán los materiales utilizados y se justificará cada una de las decisiones tomadas.

El siguiente capítulo, se confeccionará un presupuesto detallado, donde serán considerados tanto gastos de materiales y dispositivos, como horas de trabajo.

A continuación, en el siguiente capítulo se explican las conclusiones extraídas del proyecto, justificándolas adecuadamente, e incluyendo comparativas de las tipologías de control estudiadas.

También se dedica un breve capítulo a la introducción de posibles trabajos futuros teniendo como base el proyecto realizado. Este tipo de trabajos no tienen un alcance cerrado, por lo que es posible, si fuese necesario o interesante, ampliar el alcance para tratar de mejorar o conseguir nuevas aplicaciones.

Al final de este documento se incluyen diferentes anexos relevantes como las hojas de características de los dispositivos y demás documentación informativa. Además, se explican más en profundidad aspectos específicos del proyecto que en el capítulo correspondiente no se ha podido incluir

2 Estado de la Técnica

En los últimos tiempos el campo de la rehabilitación ha resurgido con fuerza gracias a los avances tecnológicos recientes. De entre la multitud de aplicaciones que engloba, las dedicadas a las extremidades conforman la mayor parte, centrándose en ejercicios de brazos y piernas. Tras investigar y recabar información sobre el tema, se optó por orientar este proyecto hacia algo que no está tan extendido o divulgado, la mano, más concretamente los dedos de la mano.

Las extremidades son las partes del cuerpo más vulnerables de cara a un accidente por lo que existen más personas a nivel mundial que dedican sus estudios e investigaciones a ellas. Las piernas pueden sufrir lesiones de diferente gravedad, desde torceduras de tobillo a fracturas de huesos o roturas de ligamentos entre otros. Lógicamente los ejercicios de recuperación son muy diferentes en cuanto a movimientos, repeticiones o carga.

2.1 Rehabilitación

Como ya se ha mencionado, la rehabilitación está en constante progreso, y evoluciona conforme lo hace la ciencia y la tecnología. Los ingenieros e inventores tratan de adaptar los avances para incorporarlos a algún tipo de sistema que lo haga útil para rehabilitar partes del cuerpo de pacientes que lo necesiten.

Este proyecto nace de la necesidad de avanzar en la rehabilitación de los dedos de la mano, ya que a pesar de haber prosperado mucho en los últimos años, este avance se ha producido en menor medida que en los sistemas para brazos, piernas, etc [1].

Por otro lado, las líneas de investigación abiertas, frecuentemente se dirigen hacia la sustitución mediante prótesis y no tanto a facilitar la recuperación natural del músculo, hueso o ligamento lesionado. Las prótesis son un trabajo más vistoso de cara al gran público ya que

dotan de miembros funcionales a personas que por enfermedad o accidente los han perdido. En ocasiones se tiene en cuenta también la estética. Sin embargo, no es un trabajo tan llamativo a priori el hecho de evitar la necesidad de dichas prótesis. A primera vista y con una breve investigación sobre el tema se puede comprobar que la información sobre sistemas rehabilitadores para manos o dedos no es tan amplia como se pudiera pensar en un inicio, y por ello este proyecto quiere contribuir a esta faceta del desarrollo de la tecnología.

Las lesiones en manos y dedos requieren ejercicios y movimientos específicos que afecten directamente a la zona dañada. Hasta hace poco tiempo, los fisioterapeutas únicamente disponían de sus manos para ejecutar ciertos ejercicios, que a menudo precisaban de una segunda persona para realizarlos. Con la entrada de la tecnología aplicada a la fisioterapia, esa segunda persona puede ser suplantada por una maquina, o puede ser un mero controlador del proceso. En la Figura 2.2 [2], pueden verse algunos de los ejercicios más comunes, sencillo y de mayor eficiencia para recuperar la movilidad de los dedos en la mayor medida posible.



PUÑO

- A) De pie o sentado en una silla.
- B) Cerrar lentamente la mano, todo lo que sea posible "hasta lograr hacer puño". Nos podemos ayudar de una pelota blanda o una esponja por ejemplo.
- C) Se puede realizar con la mano sumergida en agua caliente para conseguir una mayor relajación muscular.



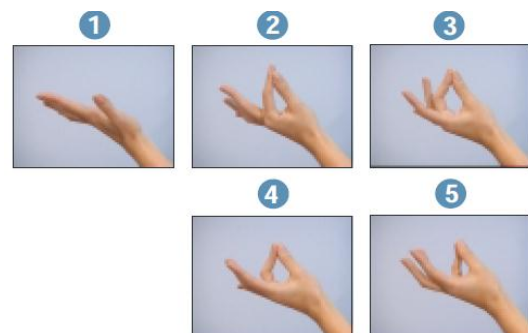
EXTENSIÓN DE LOS DEDOS

- A) Se aconseja realizar el ejercicio de pie.
- B) Abrir la mano y extender los dedos al máximo. Nos podemos ayudar si fuese necesario apretando la palma de la mano contra el plano de una mesa.



SEPARACIÓN DE LOS DEDOS

- A) De pie o sentado en una silla.
- B) Con la mano abierta intentar separar los dedos (en forma de abanico), hasta el punto máximo.



OPOSICIÓN

- A) De pie o sentado en una silla.
- B) Con la yema de cada dedo intentar contactar por separado con la yema o pulpejo del dedo pulgar.

Figura 2.1 Movimientos habituales de rehabilitación de los dedos.

De forma análoga, existen diferentes ejercicios para la recuperación del movimiento de la mano. Algunos de ellos son los observados en la Figura 2.2.



FLEXO-EXTENSIÓN DE LA MUÑECA

- A) De pie o sentado en una silla.
- B) Mano cerrada (haciendo puño), abierta o casi cerrada.
- C) Realizar lentamente movimientos de flexión y extensión de la muñeca alternativamente.



LATERALIZACIÓN DE LA MUÑECA

- A) De pie o sentado en una silla.
- B) Mano abierta y dedos extendidos.
- C) Realizar movimientos laterales con la muñeca, dirigiendo la mano hacia fuera y hacia dentro del cuerpo alternativamente.



GIRO DE MUÑECA

- A) De pie o sentado en una silla.
- B) Mano semicerrada.
- C) Hacer movimiento de rotación alrededor de la muñeca como si intentáramos abrir y cerrar una puerta (en caso de padecer osteoporosis, consulte a su médico).

Figura 2.2 Movimientos habituales de rehabilitación de la mano.

Existen infinidad de movimientos similares que ayudan a la recuperación tras lesiones, pero los mostrados son los más sencillos y extendidos, por lo que han sido la base para el desarrollo de algunos de los sistemas existentes en el mercado o al menos en fase de estudio.

Algunos de ellos, como en el caso del exoesqueleto HEXORR [3] (explicado más adelante en el Capítulo 5 y mostrado en la Figura 5.1), realiza un movimiento de extensión y contracción de la mano en dos fases, el dedo pulgar, y el resto de dedos. Se trata de un prototipo muy trabajado pero basado en un movimiento simple y eficaz que obliga a la mano en su conjunto a realizar un esfuerzo determinado. Se ha realizado un estudio piloto del dispositivo en pacientes con problemas en la función motora con dificultades para extender los dedos, el resultado muestra que las personas que recibieron tratamiento con el HEXORR aumentaron significativamente el rango de movimiento de la mano afectada. Este es un ejemplo de la necesidad de investigar en este campo. De un sistema no demasiado complejo es posible mejorar la calidad de vida de una persona en un tiempo más reducido gracias a la tecnología.

Otro tipo de sistemas de rehabilitación es el que busca ayudar al movimiento típico de cada dedo, es decir, la extensión y flexión. Es un caso similar al proyecto HEXORR pero en este se realiza el ejercicio con cada uno de los dedos por separado (Figura 2.3) [4] [5]. Esta circunstancia lo hace más eficaz como tratamiento de la lesión, pero también lo hace más laborioso a la hora de utilizarlo, ya que es necesario dedicar tiempo a cada uno de los dedos mientras que no es posible unificar el movimiento de toda la mano.

Como se observa, ambos proyectos están orientados a la realización repetitiva de extensión y flexión de cada dedo en un movimiento que en la jerga se conoce como “pinching”. El proyecto abordado en esta memoria es una derivación de este tipo de movimiento, aunque se integrará con sistemas de control adecuados y monitorización de magnitudes.



Figura 2.3 Proyectos existentes específicos para dedos.

Como proyecto más avanzado, se tiene el desarrollado en Hong Kong, y que posee un exoesqueleto completo individualizado para cada dedo (Figura 2.4). En realidad es un prototipo que pretende asistir los movimientos de los dedos, y no tanto resistir el esfuerzo ejercido por el paciente [6].



Figura 2.4 Exoskeleton Hand Robotic Training Device.

Es un sistema perfectamente integrado que posibilita más libertad de movimientos y no limitarse a extensiones y flexiones, sino que es posible realizar pequeñas torsiones y ejercicios más complejos.

Otro ejercicio habitual es el giro repetitivo de la muñeca, y se trata de un movimiento que puede ser considerado como rehabilitación de la extremidad superior, o de la mano. El proyecto Rice Wrist (Figura 2.5) persigue ejercitar el conjunto de la muñeca con movimientos de torsión del brazo y mediante el apoyo fijo de la mano [7].

Por sí solos, estos sistemas son útiles, pero también buscan que los ejercicios que tanto esfuerzo cuesta realizar, puedan hacerlos de una forma amena y entretenida en la medida de lo posible. Por este motivo, todos ellos incorporan algún tipo de interfaz gráfica que convierte en un juego los movimientos ejecutados. Estos interfaces no ayudan a los ejercicios pero hacen que el paciente se abstraiga de su problema.

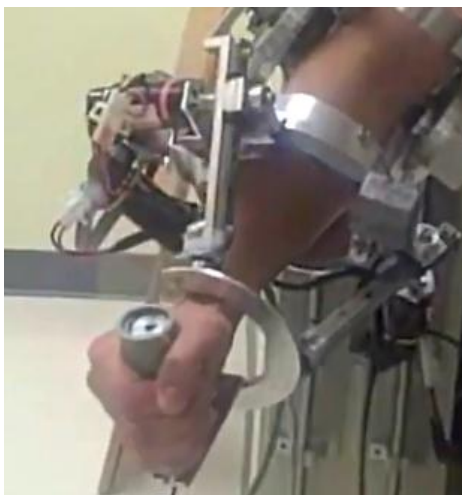


Figura 2.5 Rice Wrist.

Además, las nuevas tecnologías ayudan a cuantificar la mejoría experimentada por los pacientes de manera que mediante métodos estadísticos es posible establecer relaciones entre ejercicios y mejoría o simplemente monitorizar la evolución de la lesión. Así ocurre en un sistema diseñado con la colaboración de la Universidad Nacional de Singapur, en la que utilizan diversos métodos de rehabilitación de dedos y manos pero con un punto común, el estudio de la lesión valorando magnitudes como fuerza o aceleración en cada sesión de rehabilitación como se observa en la Figura 2.6 [8].

En el caso de dicha Figura 2.6, el estudio consta de varios sistemas mecánicos para la realización de diversos movimientos de rehabilitación. Además, se ha realizado el ensayo con todos los dedos, monitorizando la respuesta de cada uno de ellos en cuanto a fuerza, aceleración y posición. Con las medidas de todos los dedos recogidas es posible realizar comparativas minuciosas de las que extraer información muy valiosa de cara a futuros pacientes, concede al personal del sistema rehabilitador, un conocimiento que perfeccionará la recuperación de las funcionalidades perdidas.

Estos son algunos de las líneas de investigación más avanzadas que existen en el panorama de la biotecnología para rehabilitación. Todas ellas evolucionan hacia la mejora de calidad de vida de las personas que han sufrido problemas funcionales en sus manos y dedos, con el objetivo de que algún día sea posible su recuperación completa.

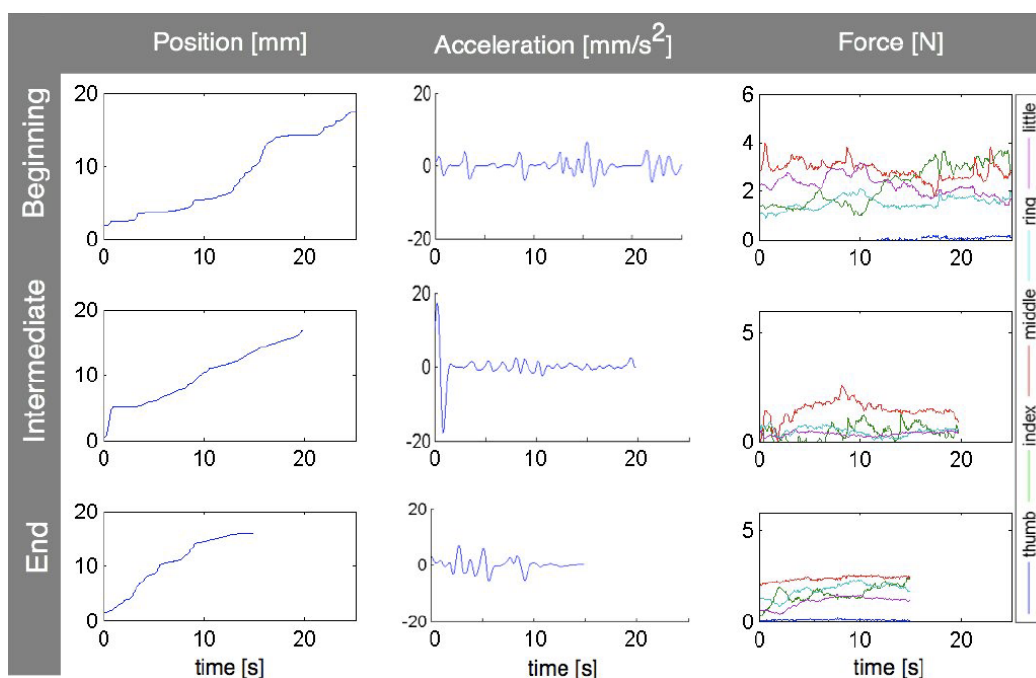
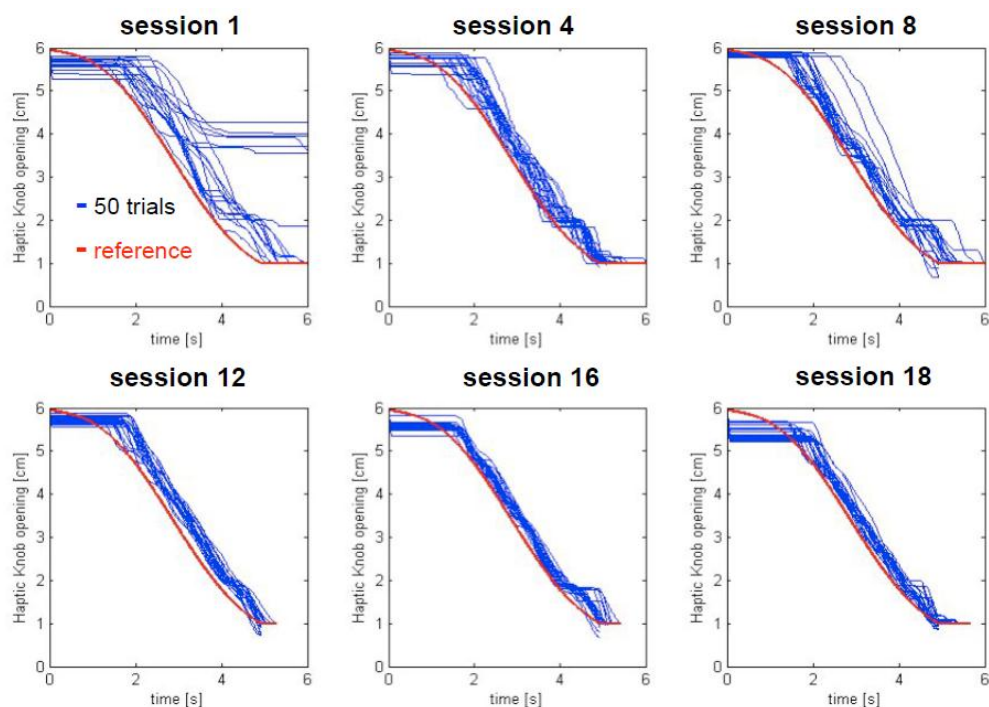


Figura 2.6 Monitorización sesión de rehabilitación.

2.2 Sistemas de control

El control está presente en infinidad de procesos y sistemas de cualquier industria existente en la actualidad. En algunos de esas industrias, la labor de control es realizada por un operario, pero muy a menudo, el control que hay que ejercer sobre el sistema, sobrepasa las capacidades de rapidez, precisión, condiciones de trabajo y eficiencia de estos operarios. Es en estos casos donde se hacen imprescindibles los sistemas de control automáticos. Debido a estas situaciones surge la automatización y los correspondientes sistemas de control de procesos.

La constante evolución de la informática, la electrónica y la tecnología en general, ha hecho posible la introducción de ordenadores en la industria con la consecuente mejora y facilidad que estos proporcionan. Desde actuadores controlados por ordenador hasta robots, máquinas de control numérico, etc., utilizan sistemas de control que hacen posibles ciertas tareas de gran responsabilidad, en los que siempre existen valores máximos, rangos de funcionamiento, valores de algunas magnitudes que deben cumplir unos requerimientos. Todo ello se hace posible gracias a estos sistemas que permiten actuar sobre partes concretas de las plantas para que todo se encuentre con la configuración óptima de funcionamiento.

Todo sistema de control viene determinado por varias características [9]:

- Estabilidad. Se conoce como estable a los sistemas que tras haber transcurrido un cierto tiempo " t " (tiempo de establecimiento), el valor de la respuesta permanece constante (régimen permanente). Por el contrario, un sistema se considera inestable cuando transcurrido ese tiempo de establecimiento, la salida no se estabiliza, oscila, o no cobra un valor constante.

- Exactitud. La exactitud del sistema se mide en base a la desviación existente entre el valor deseado (referencia) y el valor real obtenido en la respuesta del sistema (valor en estado estable), a esta diferencia se le denomina error en estado estable.

- Velocidad de respuesta. Este valor indica la rapidez del sistema a la hora de llegar a su valor de estabilización o de régimen estacionario.

- Sensibilidad. Establece la dependencia de una variable respecto de otras, y la variación o influencia de unas sobre las otras a la hora de controlar el sistema.

- Alcanzabilidad. Cuando un sistema cuenta con esta característica, entonces mediante un controlador se puede llevar este sistema desde un estado inicial hasta otro estado cualquiera, en un tiempo finito.

- Controlabilidad. Un sistema es controlable cuando es capaz de llegar a una posición de equilibrio tras un tiempo determinado.

- Observabilidad. Cuando es posible hallar cualquier estado en un instante determinado a partir de la salida, se dice que el sistema es de rango completo observable.

En todos los proyectos orientados a la rehabilitación de manos y dedos están presentes, de una forma o de otra, los sistemas de control.

El gran avance de los nuevos proyectos de este tipo es que es posible cuantificar la evolución de la recuperación y además, asistir al paciente como ayuda para la realización de la terapia. Por este motivo, siempre se encuentran motores, sensores y muchos otros tipos de dispositivos que únicamente pueden ser bien integrados mediante sistemas de control.

2.2.1 Técnicas de control

En cuanto a los métodos de control utilizados, son muy variados y con características que hacen de cada uno el más propicio para determinadas tareas o aplicaciones.

Dichas estrategias o técnicas permiten al regulador emitir una señal correctiva de manera que el sistema se corrija para alcanzar el valor de salida establecido como referencia.

Existen dos grandes grupos, métodos de control clásicos, y modernos [9].

Métodos de control clásico.

Los métodos de control clásico son aquellos que esperan a que se produzca un error para luego realizar una acción correctiva. El error se presenta a causa de la diferencia de lectura entre la variable de salida sensada y la señal de referencia. Este error está presente en todo momento, y la finalidad es minimizarlo. En algunos casos suele generarse un comportamiento oscilatorio alrededor del valor de referencia. Los métodos de control clásico pueden ser (algunos de ellos no son utilizados por sí solos):

- Control ON-OFF. El actuador únicamente consta de dos posiciones, encendido (100%) y apagado (0%). Se establece un valor de referencia que será la señal con la que se compare la variable, de manera que si la señal es mayor, el actuador adoptará una posición, y de lo contrario adoptará la opuesta.
- Proporcional (P). Se basa en que el error debe ser una señal proporcional al error obtenido. Por ello, se multiplica por una constante (P). no elimina y no corrige perturbaciones, sino que aumenta o atenúa la señal de error.
- Integral (I). Anula errores y corrige perturbaciones. Intenta ir en busca de la señal de referencia hasta que el error es nulo.
- Derivativo (D). Nunca se utiliza como base, sino que complementa a otra acción controladora como la proporcional o la integral. Acelera el control.
- Proporcional integral (PI). Controla el sistema de forma muy rápida. Además corrige el error a la vez que aporta ganancia. Anula el error por completo.
- Proporcional derivativo (PD). Es estable reduciendo los retardos, lo que supone un aumento de velocidad del lazo de control.
- Proporcional integral derivativo (PID). La salida es más rápida, más estable y en definitiva aporta la influencia de cada uno por separado, de manera que si se sintoniza adecuadamente, se dispone de un regulador muy eficaz. La sintonización puede basarse en muchas técnicas diseñadas por diferentes estudiosos de control. En la Figura 2.7 se puede observar como cada método actúa de manera diferente sobre la planta.

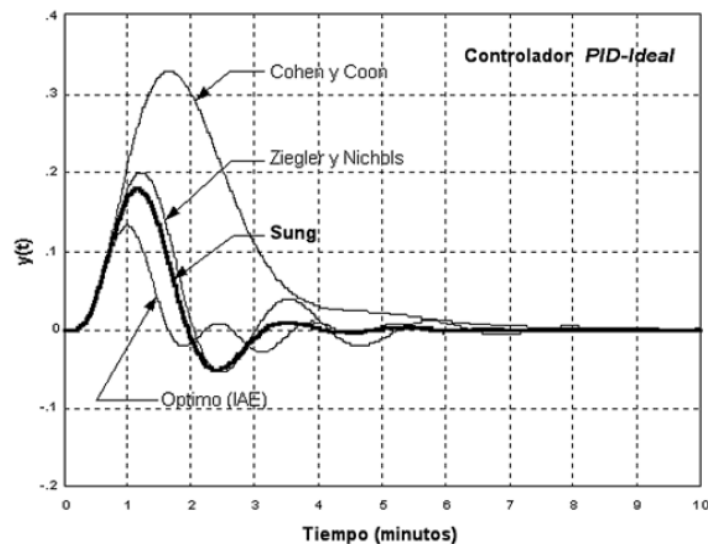


Figura 2.7 Métodos de sintonización de PID.

Este tipo de regulador será el más utilizado en este proyecto dada su simplicidad de implementación y sus grandes cualidades de control para señales y magnitudes similares a las existentes aquí.

Métodos de control moderno.

Se trata de sistemas y técnicas de control más innovadoras que se centran en el tratamiento del error. Existen varios tipos dentro de esta clasificación.

- Control anticipatorio (*Feedforward*). Es capaz de estimar la salida más probable mediante el análisis matemático de las entradas y salidas anteriores. Su desventaja radica en que es necesario medir todas las variables perturbadoras, ya que no corrige las perturbaciones no medidas. Se puede mejorar este método agregando una retroalimentación a la salida, de modo tal que se deje que se produzca un error mínimo, el cual será detectado y corregido en la siguiente medición.
- Compensadores adelanto atraso. Trabaja en el dominio de la frecuencia para compensar la fase del sistema adelantándola o atrasándola, introduciendo nuevas funciones matemáticas para ello.
- Realimentación de estados. Se basa en la medida de los diferentes estados de la salida según los estados de entrada, y mediante transformaciones matriciales, se calculan los siguientes estados del sistema. Por supuesto trabajando en el espacio de estados.
- Sistemas de seguimiento. Es un complemento del método anterior, ya que a través del control por realimentación de estados se puede llevar la variable controlada a un valor cero.
- Linealización por realimentación. Se utilizan reguladores no lineales, ya que en la realidad los procesos no lo son. Se basa en la teoría de Lyapunov para determinar la estabilidad del sistema. El modelo se representa en espacio de estados.

Métodos de control avanzado

Este tipo de técnicas se basa en un constante reajuste de los parámetros para prevenir la existencia de error. De igual manera que anteriormente, existen varios subtipos.

- Control adaptativo. Es una variante del control anticipatorio, con la diferencia de que en este caso la salida varía automáticamente. Es fundamental la aparición de ciertos algoritmos que simulen el funcionamiento del sistema partiendo de los datos de entrada y salida recabados. De este modo se genera una compensación que controlará el sistema.
- Control robusto. Es posible que la acción de control se mantenga aunque las perturbaciones externas (ruido, vibraciones...) e internas (sistemas no lineales, incertidumbre del accionamiento o de la respuesta de la planta...) estén presentes. Se basa pues, en identificar y controlar la incertidumbre de los parámetros y en el comportamiento de la planta.
- Control difuso. Está basado en la lógica difusa (*fuzzy logic*), que asocia valores intermedios, cosa que no ocurre en la lógica booleana. No precisa ningún modelo matemático sino que funciona mediante reglas dispuestas por el programador. Puede utilizarse con sistemas lineales y no lineales ya que no se modela dicho sistema.
- Control neuronal. Se usan neuronas de inteligencia artificial. Una neurona de este tipo es un elemento de procesamiento que proporciona una respuesta mediante una multiplicación de su vector de entradas por otro vector de pesos, y luego aplicando una función de activación. Se caracteriza por su capacidad de aprendizaje, rápido procesamiento de gran volumen de datos (paralelización) y por su facilidad de modelado de sistemas no lineales.
- Algoritmos genéticos. Se basa en la teoría de la evolución de Darwin, es decir, la información sufre modificaciones de igual manera que las sufren todas las especies para adaptarse al entorno. Mediante funciones evolutivas, en cada iteración se sustituyen las antiguas funciones por las nuevas, adaptándose a los cambios de comportamiento del sistema. De esta forma se eliminan datos con mayor error y permanecen otros con menor error (selección natural).
- Sistemas expertos. Tratan de recrear la experiencia acumulada por los seres humanos. Se basa en grandes bases de datos introducidos por personas en los que se dan casos de situaciones y las diferentes soluciones que se pueden adoptar. También puede adquirir su propia experiencia con el objetivo de mejorar el control sobre el sistema.

Todas estas técnicas han sido desarrolladas con el paso de los años pero constantemente se reinventan dando enfoques radicalmente opuestos para enriquecer el conocimiento sobre el control de sistemas.

2.2.2 Control de fuerza

Uno de los objetivos de este proyecto es el control de fuerza ejercida por el motor sin la utilización de un sensor específico para ello. El modo contemplado será el de control de la fuerza a través del control de consumo del motor. Este tipo de estudios no es pionero y existen grupos cualificados de personas que han dedicado buena parte de su tiempo a esta línea de investigación.

La relación entre intensidad consumida por el motor y el par desarrollado es un dato accesible que aporta la información necesaria para llevar a cabo el estudio. Como uno de los estudios representativos sobre el tema de control de fuerza, existe un proyecto de la Universidad de Nanjing [10] en el que se controla el par ejercido por el motor, aunque la fuerza y el par están relacionados mediante la distancia de la línea de acción de la fuerza hasta el punto de giro. En caso de no disponer de ningún sistema adicional como poleas o engranajes, esta distancia coincidirá con el radio del eje del motor. En este proyecto se controla la fuerza mediante el estudio de la relación entre velocidad y fuerza contra-electro-motriz (f.c.e.m.).

El proyecto mencionado es el claro ejemplo del interés que suscita el poder controlar ciertas magnitudes con el ahorro que supone la eliminación de sensores. Mediante *software* y un planteamiento correcto se llega a buen puerto.

Este tipo de diseños sin sensores de fuerza son muy valorados en la comunidad científica, aunque no todos están orientados a proyectos relacionados con la rehabilitación. La rehabilitación constituye un entorno más donde poder aplicar estas investigaciones hacia la evolución de la tecnología al servicio de las personas.

2.3 Prototipo

Una tercera parte en el análisis del estado de la técnica, es el sistema físico construido, que en ocasiones no supera la fase de prototipado. El diseño de un mecanismo sobre el que actúe la idea desarrollada, es un trabajo complejo que combina muchas especialidades de la ingeniería.

Cada diseño se caracteriza por el movimiento de la mano o de los dedos de la mano que va a controlar. Bajo esta premisa, el sistema puede adoptar unas formas u otras según se concluya, tras un estudio previo, cual es el más adecuado para desempeñar esta función.

El prototipo incluye todo el sistema, desde el exoesqueleto que transfiere las acciones de cada motor a la mano, hasta la placa de desarrollo y cualquier otro dispositivo necesario para que sea funcional.

Lo ideal sería que su tamaño no fuera excesivamente grande y que se adaptara lo mejor posible a la anatomía de la mano del paciente, pero a menudo esto no se consigue. Sobre todo en cuanto a volumen y peso del sistema completo. Tanto motores como estructuras rígidas, como fuentes de alimentación, etc. contribuyen a un prototipo a veces demasiado pesado para ser fácilmente transportable. Por este motivo, otra línea de desarrollo es la que se centra en la miniaturización de los componentes y dispositivos electrónicos para hacer sistemas más cómodos y menos aparatosos.

Un exoesqueleto, como su propio nombre indica, es una estructura a modo de esqueleto que se adapta a una determinada parte del cuerpo para darle consistencia y poder así actuar sobre él para provocar una respuesta a una acción ejercida por el paciente. En el caso concreto de este proyecto, la mano estará revestida por dicho armazón de modo que se pueda controlar los movimientos de cada uno de los dedos.

Es en este apartado donde más posibilidades existen a la hora del diseño. Podemos encontrar exoesqueletos rígidos y flexibles, con sistemas mecánicos más o menos complejos según el movimiento que se desee conseguir.

Uno de los exoesqueletos más utilizados es de tendones. Se trata de reproducir los mecanismos reales del cuerpo humano para poder generar movimientos de un modo similar. Utiliza hilos de acero o cualquier otro material suficientemente resistente, para transmitir el movimiento del eje del motor a la falange correspondiente. Del mismo modo que en los tendones reales, cada uno de ellos únicamente es capaz de trabajar a tracción, por lo que se necesitan pares de tendones para realizar movimientos completos, es decir, un tendón produce la flexión cuando trabaja a tracción, y su par correspondiente produce la extensión cuando trabaja a tracción y el otro ha dejado de traccionar. Así se puede ver en la Figura 2.8, donde cada uno de los tendones está acoplado estratégicamente a cada lado del dedo para poder generar los movimientos.

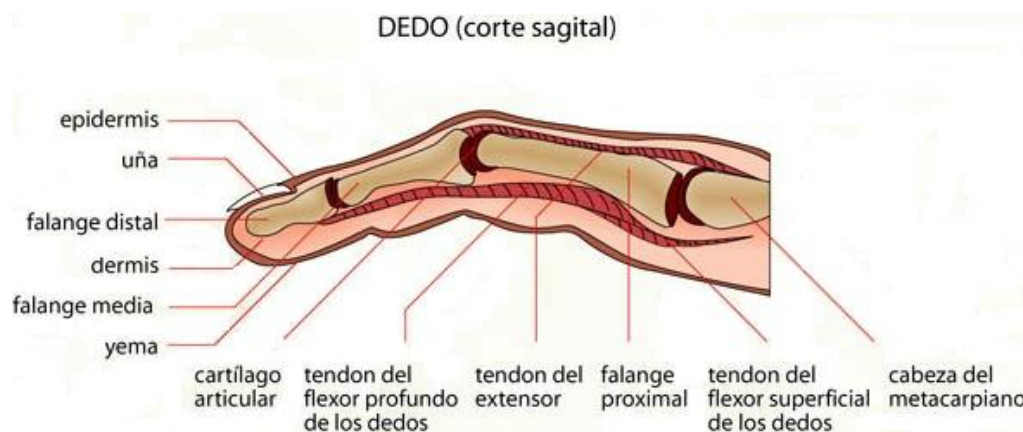


Figura 2.8 Acoplamiento de los tendones del dedo.

Como puede observarse, la inserción de cada tendón en el hueso se realiza en diferentes falanges. No se trata de un error. En la realidad, este hecho permite a las personas que cuando el tendón del flexor se contraiga, la falange distal se aproxime completando el movimiento de flexión del dedo. Por el contrario, el tendón del extensor se contrae para erguir el dedo por completo. No es necesario que este tendón se inserte en la falange distal, sino que con hacerlo en la falange media es suficiente, ya que el movimiento de las dos falanges nombradas está acoplado. De esta manera se da consistencia y fuerza al dedo a la hora de extenderlo.

Como ya se ha comentado, este tipo de exoesqueletos basados en replicar el funcionamiento real de los dedos ha sido muy utilizado en proyectos de rehabilitación. Es el caso de HandCARE (Figura 2.9), un proyecto llevado a cabo por el Imperial College London [8], donde se utilizan cables de acero unido a unas argollas, de donde se tirará con cada dedo. Dichos cables están

Estado de la Técnica

conectados al sistema que evalúa fuerza, posición y aceleración de cada repetición y de cada sesión de rehabilitación.



Figura 2.9 Sesión con HandCARE.

Otro prototipo de este tipo es el construido por Cutkosky haptics lab en la universidad de Stanford [11] y cuya foto ya se ha mostrado en el capítulo de introducción (Figura 1.2). En él se aprecia de una manera más clara la función de los tendones artificiales y el funcionamiento del exoesqueleto completo. El funcionamiento del proyecto a realizar persigue idéntico resultado que este último.

Otro modelo de exoesqueleto es el basado en un guante. Se fabrica o adapta un guante con una rigidez determinada, y mediante estructuras externas o tendones se consigue controlar los movimientos realizados por la mano.

La rehabilitación no es la única aplicación donde son utilizados guantes adaptados o transformados, sino que son susceptibles de ser usados en aplicaciones de realidad virtual, o como hápticos para controlar robots externos con el movimiento de una persona (Figura 2.10). Así ocurre en los proyectos realizados en la Universidad Pontificia de Bogotá en 2005, que realizaron una aplicación orientada a simular el sentido del tacto de objetos en realidad virtual [12]. Por otro lado se tiene el proyecto Provancher and Cutkosky 2006 [13], en el que se utiliza un mecanismo de este tipo para el manejo de un *háptico* remoto para manipulación de objetos.



Figura 2.10 Aplicaciones de realidad virtual y hápticos.

Existen también otros métodos de interacción entre manos y sistemas de control como son los exoesqueletos rígidos, con estructuras consistentes y mecanismos complejos para resistir los esfuerzos realizados por la mano del paciente (en el caso de la rehabilitación). Los proyectos comentados en el apartado 2.1 y mostrados en la Figura 2.3, son similares a estos, fundamentados en estructuras rígidas sobre las que actúa el motor debidamente controlado.

Por último, existen modelos híbridos que toman características de varios de los tipos ya descritos. Es el caso del proyecto “Exoskeleton Hand Robotic Training Device”, se utiliza un exoesqueleto metálico muy consistente pero que funciona con actuadores neumáticos, sustituyendo a los motores que integran muchos otros prototipos (Figura 2.4).

Una vez valorados todos los sistemas y líneas de investigación abiertas en la actualidad, el proyecto que ha sido elegido incluye un exoesqueleto flexible y adaptable que será el encargado de trasladar el movimiento de los dedos de la mano a un entorno de desarrollo donde puede ser procesado, tratado y controlado. De la misma manera se actuará sobre el exoesqueleto en el modo inverso.

También se ha estudiado el estado de la técnica en lo que a sistemas de control se refiere, y con dicha información se pretende implementar controles adaptados a las características de la aplicación destino. Además, se ha marcado como objetivo el abaratamiento de este tipo de sistemas en los que la introducción de sensores aumenta el coste de producción de manera muy notable. Por ello se estudiará la viabilidad de medir magnitudes como corriente, par o fuerza, por otros métodos de coste reducido.

En lo que sigue se explicarán todos los aspectos considerados para la realización de este proyecto y todas las decisiones tomadas y sus correspondientes justificaciones bien teóricas, o bien experimentales.

3 Hardware

A lo largo del presente capítulo se va a describir las características de cada uno de los dispositivos utilizados para la realización de este proyecto. Se ha dividido en secciones que corresponden a cada uno de ellos, donde se explican los aspectos más interesantes e importantes para la aplicación que se va a desarrollar. A continuación, se expone un esquema general del sistema completo utilizado (Figura 3.1), como guía para el correcto seguimiento del capítulo.

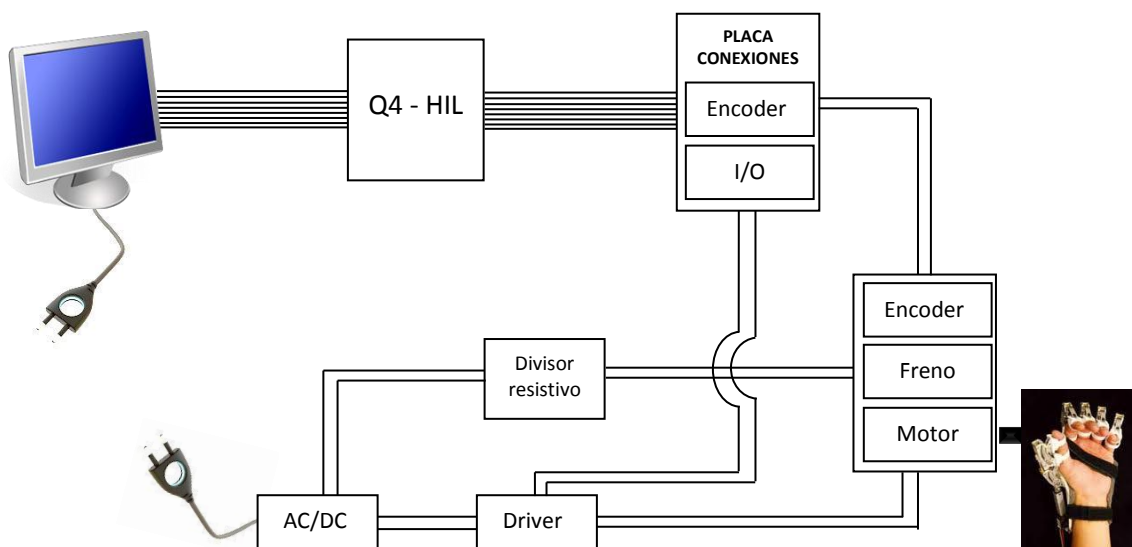


Figura 3.1 Esquema general del sistema completo.

3.1 Placa de desarrollo

Para llevar a cabo este proyecto, se dispone de una tarjeta de desarrollo de la empresa Quanser. Por ello el entorno de desarrollo y el lenguaje deberán ser compatibles con esta herramienta de hardware y precisará de un software que integre dicho entorno con la placa. Este software es QuaRC, producto de Quanser.

La placa utilizada será la Q4 High-Performance H.I.L Control Board de Quanser. Mediante la herramienta QuaRC, se puede sintetizar casi cualquier diseño de software en un dispositivo externo. Esto significa que es posible implementar un diseño genérico, en un lenguaje determinado, para ser aplicado a un dispositivo físico real, como pueden ser motores, sensores, etc.

Existe una variante de esta placa de desarrollo utilizada, la Q8, que dispone del doble de conexiones. En la Figura 3.2 se pueden observar las partes más características.

La placa utilizada consta de una tarjeta PCI insertada en un ordenador y un interfaz de conexiones de entrada-salida. La comunicación entre la tarjeta y la interfaz de conexiones se realiza mediante dos buses planos.

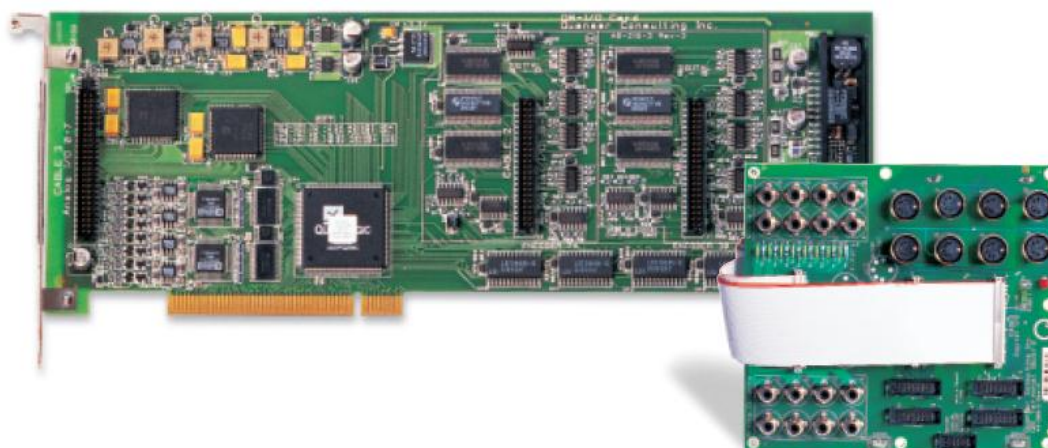


Figura 3.2 Placa de desarrollo Q8 de Quanser

La placa de conexiones dispone de:

- 4 conectores de encoder tipo DIN
- 4 entradas analógicas
- 4 salidas analógicas
- 16 pines digitales configurables como entradas o salidas indistintamente.

Las características de la placa aparecen detalladas en el datasheet disponible en el Anexo A4.

La instalación física de la placa en el ordenador es muy sencilla salvo por el tamaño de la tarjeta PCI, que puede ocasionar problemas de espacio. Por este motivo, es aconsejable

Hardware

disponer de una CPU vertical, ya que otro modo será necesario un alargador para la ranura de tarjetas PCI. Es importante asegurarse de que las conexiones son correctas antes de alimentar la placa, ya que es fácil romper alguno de los dos fusibles cerámicos que incorpora.

El entorno de desarrollo elegido por su simpleza y versatilidad es Matlab, más concretamente la herramienta gráfica Simulink. Además se trabajó sobre Windows aunque es posible instalarlo en Linux o Qnx. Se trata de una herramienta que se ejecuta bajo Matlab y que permite una programación mucho más rápida y visual. Permite generar señales, acondicionarlas, leerlas o escribirlas en las salidas de la tarjeta PCI de Quanser, y simular cualquier otro sistema físico.

Por sí solo, Matlab no tiene capacidad de interactuar con la placa de Quanser. Por ello es necesario el programa QuaRC, que completará las librerías de Matlab para hacerlas compatibles con la Q4 Board. Estas bibliotecas contienen multitud de nuevos bloques listos para ser usados y que permiten modelar nuestro sistema diseñado con motores o cualquier tipo de actuador físico. Estas librerías de QuaRC incorporan bloques para todos los campos de la ingeniería, desde la aeronáutica hasta el control de sistemas electrónicos, pasando por bloques que simulan dispositivos comerciales como ciertos microprocesadores u otros como el Wiimote de Nintendo. Los bloques también pueden ser programados por el usuario.

Por tanto, para tener operativo el sistema completo de desarrollo, con todas sus funcionalidades, tendrá que instalarse Matlab, QuaRC y el hardware. La instalación requiere seguir una serie de pasos precisos para no tener problemas que se detallan en el Anexo A1. También es importante prestar especial atención a los requisitos de compatibilidades de los programas.

El uso de estas tarjetas de desarrollo comerciales simplifica muchísimo la tarea del hardware, ya que cualquier software diseñado y cargado en la tarjeta puede ser ejecutado con total garantía de éxito. De esta manera se evita la creación de las distintas *Printer Circuit Boards* (PCB) necesarias para cada uno de los diseños probados. Otra ventaja a destacar es la capacidad de ejecutar más de un programa a la vez. Además, este modelo permite introducir modificaciones en el programa sin detener la ejecución en la tarjeta, lo que ahorra un tiempo muy considerable.

La principal desventaja es la limitación que esta tarjeta tiene en cuanto a potencia de entrada y salida en cada uno de los conectores disponibles, lo que repercute de forma directa en los rangos de tensión y corriente admitidos. Esto se debe a que se trata de un dispositivo orientado al control de sistemas por lo que las señales esperadas tendrán reducidas potencias. Es decir, este módulo está orientado a la generación de señales de control y no a gestionar la potencia del equipo. Otra limitación a tener en cuenta es el reloj de la placa que permite tener ciclos de un mínimo de 2 ms. No será posible entonces ejecutar programas que requieran una mayor velocidad de ejecución. Por último, obviamente el número de entradas y salidas disponibles, puede suponer una limitación, aunque para este proyecto se prevé que sean suficientes. De cara a futuros trabajos podría ser necesaria una ampliación que requiriera una tarjeta de mayores prestaciones.

3.1.1 Generación del modelo del hardware

En este apartado se va a describir cómo comenzar a utilizar la herramienta QuaRC para el diseño del sistema. En el *Workspace* (WS) de Matlab, se debe escribir la palabra Simulink en la ventana de comandos y pulsando la tecla *Enter* se accede a la herramienta.

Creando un nuevo archivo podemos arrastrar a él los bloques que deseemos desde la ventana de librerías (Figura 3.3). Una de dichas librerías es la introducida por la instalación de QuaRC, y en ella se encuentran los bloques de lectura y escritura de entradas y salidas entre otros.

Cuando se ha modelado el sistema completo, se debe marcar la opción *external* en un desplegable situado en la barra de herramientas, y que por defecto aparece como *normal*. Esto, junto con la inclusión de un bloque de configuración de QuaRC, nos da la posibilidad de ejecutar el sistema en la placa de desarrollo. También es posible simular el sistema si se selecciona la opción ya mencionada de *normal*. Nótese que en modo de simulación, la referencia temporal está acelerada, es decir, cada segundo real corresponde a un tiempo mayor en la simulación. No ocurre esto en modo *external*, cuya referencia de tiempos es real.

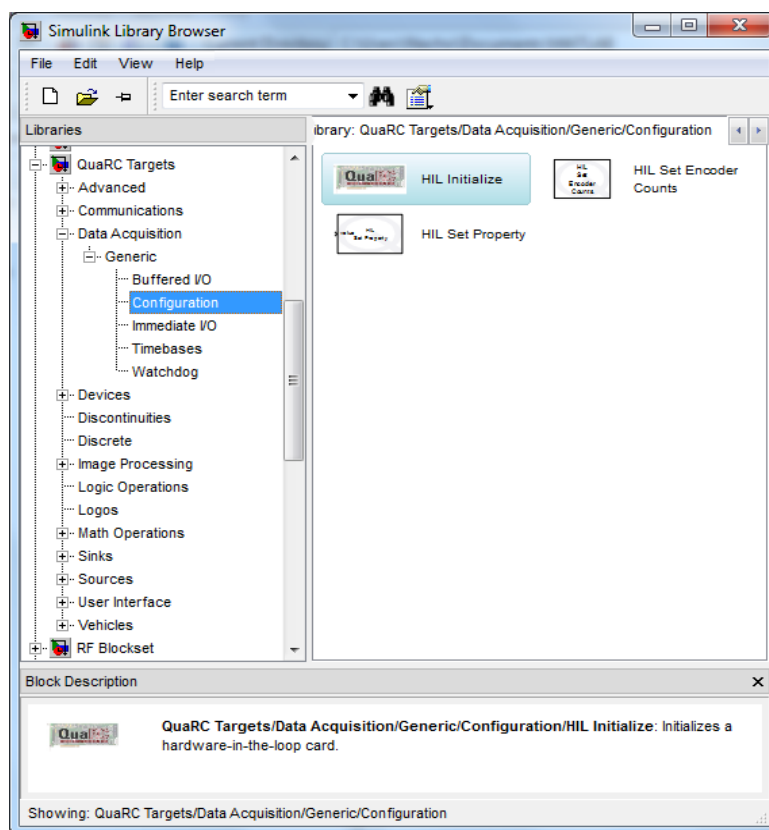


Figura 3.3 Librerías de QuaRC en Matlab

3.2 Fuente de alimentación

Todo el sistema debe ser alimentado con una fuente de energía. En este caso particular, se necesita una fuente de 100w como mínimo, ya que esa es la potencia que demanda el driver para operar correctamente como amplificador, como se explica en la sección dedicada al driver. Si se dispusiera de menos potencia, el sistema podría sufrir fallos ante picos elevados de corriente, por lo que se debe asegurar que esto no ocurra. También es importante que la fuente tenga la salida estabilizada y que disponga de protección contra cortocircuito.

La fuente elegida es la OMROM S82J-10024 y su elección está motivada por la disponibilidad de dicha fuente. Las características principales son:

- Tensión de alimentación: 100 a 240VAC (50-60Hz)
- Potencia de salida: 100w
- Corriente de salida: 4.5ª
- Tensión de salida: 24V
- Eficiencia: 83%

Según las especificaciones de este proyecto, la fuente debe ser calibrada para entregar 24 voltios para alimentar correctamente al driver y el freno del motor. Dado que la potencia de la fuente es de 100w y conocida la relación simple entre potencia, corriente y tensión, se tiene que la corriente absorbida es:

$$P = V \times I \quad (3.1)$$

$$I = P/V = 100/24 \approx 4,17A \quad (3.2)$$

Al tratarse de un dispositivo que entrega una potencia moderada, se debe tener en cuenta que disponga de los suficientes disipadores de calor o garantizar una correcta ventilación de la zona, para evitar un sobrecalentamiento.

La conexión de este tipo de fuentes es muy simple. Únicamente hay que conectarla a la red doméstica convencional con toma de tierra por seguridad, siempre que sea posible. Esta fuente tiene dos conectores adicionales en los que se obtiene la diferencia de potencial directamente del rectificador. Hay que tener especial cuidado de no manipular las conexiones con la alimentación conectada ya que se puede sufrir una descarga accidental.

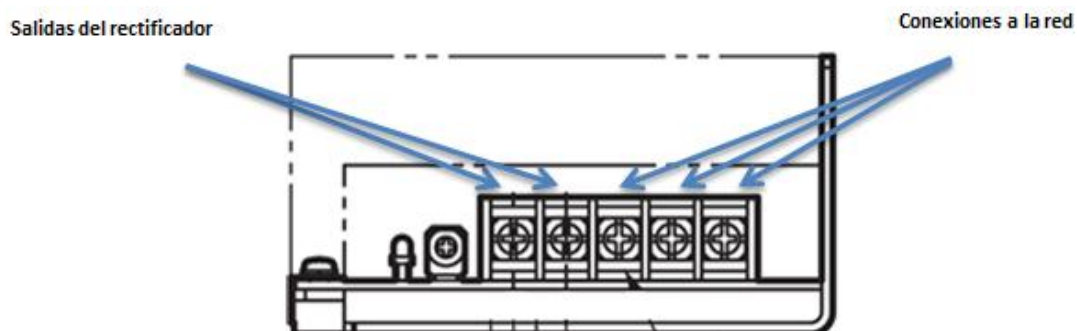


Figura 3.4 Bornas fuente de alimentación

3.3 Driver

Este elemento se conecta entre el motor y la placa de desarrollo, y su misión principal es adaptar las señales de salida de ésta última a las especificaciones de entrada del motor.

El motor admite como tensión de alimentación cualquiera comprendida entre los 0 y los 24 voltios. Este rango hace necesaria la presencia del driver como amplificador de la señal de salida de la placa de desarrollo de Quanser, que por diseño está limitada a un máximo de 10 voltios. Este máximo es una limitación interna del hardware de la placa. Sin embargo, existe la posibilidad de modificar los rangos de salida de las señales siempre sin superar el límite mencionado. Dicha configuración será seleccionada mediante software.

En este proyecto, el amplificador utilizado no será tal, sino que se utilizará un driver configurado como amplificador. Esta opción abre un nuevo horizonte de posibilidades ya que el propio driver, mediante programación interna, es capaz de controlar un motor tanto en posición como en velocidad, y crear muchas otras configuraciones que en este proyecto se harán a través del entorno de desarrollo de QuaRC. Es decir, sería posible prescindir de la placa de desarrollo pero esta opción limitaría demasiado el alcance del sistema de control, ya que el driver controla el motor mediante un regulador PID, y el resto de formas de control no podrán ser implementadas.

El driver elegido es suministrado por la marca Faulhaber, serie MCD2805. De entre los innumerables modelos de driver en el mercado, se elige éste por motivos tanto económicos como de disponibilidad, de manera que se evitan esperas en la entrega ganando un tiempo importante. Por otro lado, tanto motor como encoder como driver pertenecen a la misma marca, lo que evita problemas futuros de compatibilidad de dispositivos. Además, existen dos características de especial interés para nuestro sistema, la resolución y la ganancia como amplificador.

La resolución viene determinada por el diseño electrónico del dispositivo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el driver no es el elemento encargado de contar los pulsos, sino que de eso se encarga el encoder acoplado al motor, por lo que es necesario estudiar cual de ambos elementos es el que limita la precisión. Teniendo en cuenta que el driver posee una estructura de 16 bits y que el encoder puede detectar hasta 500 pulsos por revolución, se tiene:

$$Resolución_{driver} = 360^\circ / 2^{16} = 0.005^\circ \quad (3.3)$$

$$Resolución_{encoder (x1)} = 360^\circ / 500 \text{ pulsos/rev} = 0.72^\circ \quad (3.4)$$

$$Resolución_{encoder (x4)} = 360^\circ / 2000 \text{ pulsos/rev} = 0.18^\circ \quad (3.5)$$

Éste es un punto muy importante de cara al diseño de los sistemas de control del motor, ya que puede que se convierta en una magnitud limitante del lazo de control. Como se acaba de demostrar, la resolución viene impuesta por la del sensor, lo que permite una elección más barata del driver, ya que la resolución es uno de los factores más determinantes en cuanto a precio del dispositivo.

Hardware

La ganancia del driver funcionando como amplificador, no es un valor constante, por lo que se ha operado con una aproximación obtenida de una regresión lineal. Como puede verse en la Figura 3.5, se ha utilizado la pendiente de la regresión para estimar la ganancia. Para ello, se ha medido la tensión de salida respecto de la tensión de entrada. Conviene destacar que para lograr una mayor fiabilidad de los ensayos, esta regresión ha sido realizada con el motor conectado al driver pero sin cargas adicionales. El motivo de que el rango de la tensión de entrada al driver sea de 0-10 V, es porque corresponde con la tensión de salida de la placa de desarrollo, que como ya se ha explicado, no es capaz de generar señales de más de ese valor.

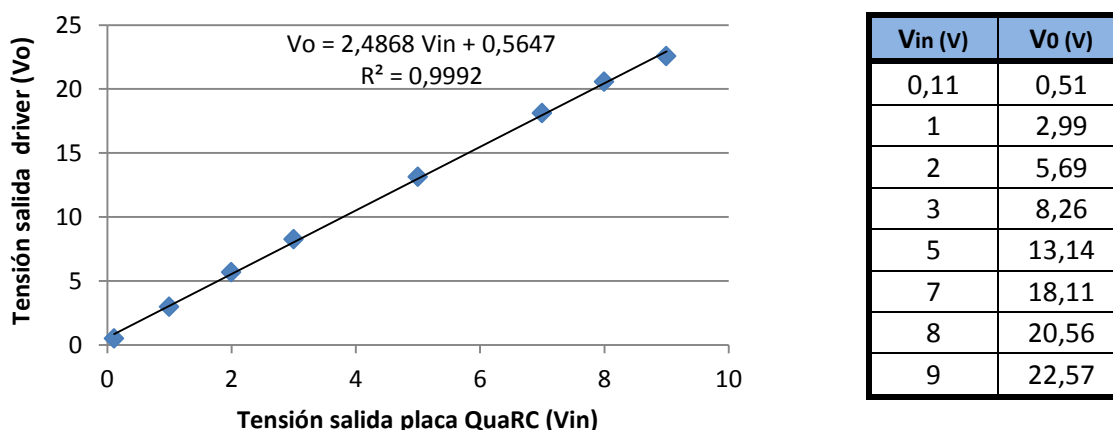


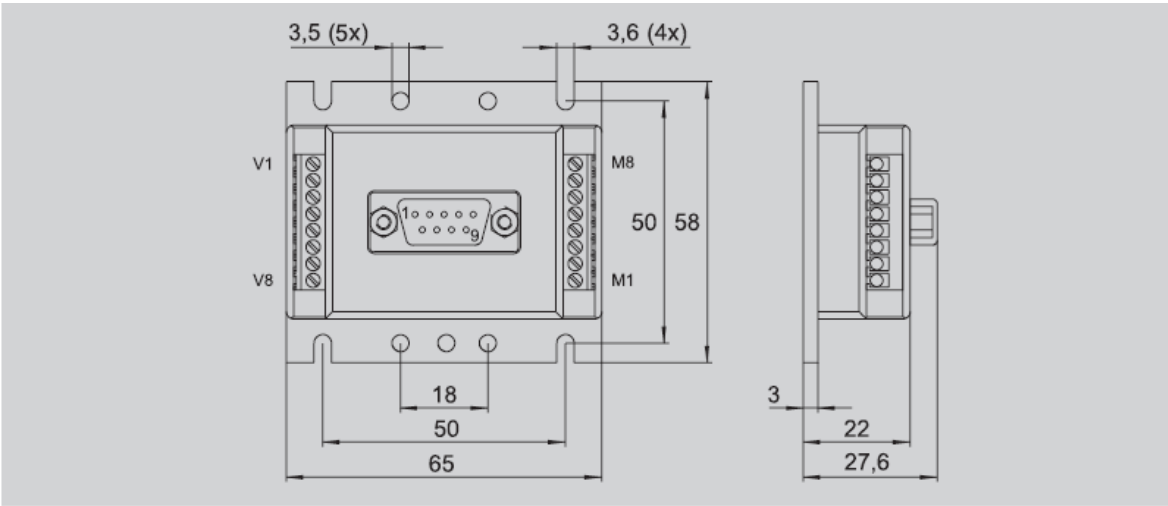
Figura 3.5 Regresión ganancia driver

En la Figura 3.5 se puede apreciar un detalle importante a tener en cuenta a la hora de realizar mediciones. Los datos usados están acotados a 22,57 V cuando la alimentación es de 24 V, y esto es causado por la saturación interna del driver. Dicha saturación viene determinada por la impedancia interna del propio driver, la cual hace que la ganancia del driver no sea puramente proporcional. En el caso ideal, la resistencia interna sería nula, y como consecuencia, la tensión de alimentación del dispositivo saldría íntegramente por la salida. Al no ser ideal, existen pérdidas, y de ahí que la máxima tensión transferida al puerto de salida sea de 22, 57 V.

Por otro lado, también existe una zona muerta en el funcionamiento del motor, debido a la cual, los valores para la regresión empiezan con 0,11 V de salida de la placa de desarrollo, correspondiendo a la mínima tensión que hace que el motor funcione, según la gráfica de la Figura 3.5, 0,51 V. la razón hay que buscarla en el coeficiente de rozamiento estático de los rodamientos del eje del motor. Este hecho también se ve reflejado en la ecuación de la recta de regresión en forma de ordenada en el origen. El motivo de la no coincidencia de ambos valores es que la ecuación pertenece a una estimación, y puede variar de los valores reales según el coeficiente R^2 .

Como se indica en la Figura 3.5, la pendiente media de la regresión es de 2,49 V/V y este valor será utilizado más adelante en la programación de los controles del motor. Además se observa como el parámetro R^2 es muy elevado, por lo que podemos adoptar la regresión como significativa y por lo tanto como representativa del comportamiento real del amplificador.

En la Figura 3.6 y Figura 3.7 se indica un esquema de los terminales de conexión del driver:



Connections

Supply Side:

No.	Function
V1	RS-232 TXD
V2	RS-232 RXD
V3	Analog GND
V4	Fault Output
V5	Analog Input
V6	+24V
V7	GND
V8	Input No. 3

SUB-D Connector:

No.	Function
2	RS-232 RXD
3	RS-232 TXD
5	GND

Motor Side:

No.	Function
M1	Input No. 5
M2	Input No. 4
M3	Channel A
M4	Channel B
M5	VCC (+5V)
M6	Signal GND
M7	MOTOR+
M8	MOTOR-

Figura 3.6 Plano conexiones driver

Como ya se ha comentado anteriormente, el driver puede ser programado para que realice por sí solo funciones básicas de control. La programación se realiza mediante una aplicación específica de Faulhaber denominada Motion Manager 4.6. Se trata de un software gratuito que se encuentra disponible en la página oficial de la compañía. Esto da la posibilidad de programar los diferentes sistemas de control en función de los parámetros sintonizables en el dispositivo.

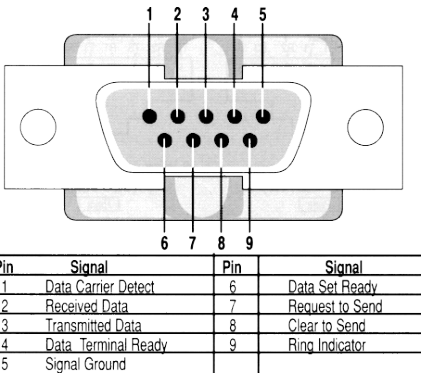


Figura 3.7 Conexiones cable RS-232.

Para la conexión del driver al PC es necesario un cable de conexión RS-232 directo para la comunicación de datos entre ambos dispositivos.

Es posible sintonizar parámetros como sentido de giro, y visualizar en tiempo real las diferentes señales de entrada y salida del dispositivo. Este interfaz posibilita una nueva forma de tratamiento y análisis de las señales del sistema, pero que en la elaboración de este proyecto no será necesaria.

3.4 Freno

El freno tiene como misión mantener el motor en una posición de bloqueo cuando éste no está alimentado. Es un sistema típico de los motores en la industria de la robótica, ya que ante un eventual fallo, sería un peligro que un motor cediera por falta de alimentación, pudiendo provocar daños personales y en el propio sistema.

Aunque en este proyecto se ha usado un conjunto formado por motor, freno y encoder, en realidad se trata de un módulo adicional que se acopla al conjunto del motor y cuyo funcionamiento es muy sencillo. Consta de un electroimán que normalmente, en condiciones de reposo, presiona el eje del motor. Cuando se alimenta, la corriente genera un flujo electromagnético suficiente para atraer las piezas móviles del freno, venciendo la fuerza ejercida por el muelle). Cuando el freno está alimentado a la tensión adecuada, deja de actuar sobre el eje del motor, quedando éste libre. En el momento en el que esta tensión cesa, uno o más resortes devuelven el freno a la situación de reposo. Por ello, es necesario alimentar el freno siempre que se requiera el movimiento del eje del motor

Con el objetivo de utilizar una única fuente de alimentación, se ha diseñado un pequeño circuito electrónico para poder alimentar a la vez el driver (24V) y el freno del motor (22V). Se ha implementado un divisor resistivo como el que aparece en la Figura 3.8.

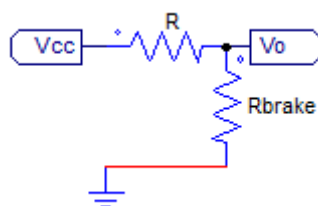


Figura 3.8 Esquema divisor resistivo para alimentación del freno

La tensión V_{cc} es la tensión de alimentación del driver y que es fija, proveniente de la salida de la fuente de alimentación. La tensión V_0 es la necesaria para actuar el freno. La resistencia R_{brake} tiene un valor conocido gracias a la hoja de catálogo del freno (Anexo A4), y tiene un valor de 81Ω . Por último, R será la resistencia adicional que se debe de colocar para conseguir los 22 voltios y cuyo valor hay que determinar.

$$\frac{V_{cc} - V_0}{R} = \frac{V_0}{R_{brake}} \quad (3.6)$$

$$R = R_{brake} \left(\frac{V_{cc}}{V_0} - 1 \right) \quad (3.7)$$

$$R = 7,36\Omega \quad (3.8)$$

Con el fin de realizar los cálculos de una manera más exacta, conviene verificar los valores de las especificaciones técnicas. Así se tiene que la resistencia real del freno es de 93Ω y no 81Ω como aparece en el catálogo. De esta forma se tiene que la resistencia necesaria para la implementación del divisor resistivo es de **$R = 8,455\Omega$**

Según los componentes disponibles, se opta por una resistencia de 11Ω , un valor por encima del calculado y que supone una alimentación del freno de 21,46V, suficiente para excitar la bobina del electroimán.

3.5 Motor

En este proyecto, el motor es el dispositivo que se pretende controlar, y a través de él, controlar velocidad, posición y sobretodo fuerza del paciente.

Se trata de un motor FAULHABER 3257G024CR de corriente continua de imán permanente y sin escobillas, lo que evitará pérdidas por fricción. La elección de este motor viene determinada por las características adecuadas del mismo y por estar disponible en el departamento.

A continuación se explicará brevemente el funcionamiento de este tipo de motores ya que será necesaria su caracterización para posteriores fases del proyecto.

3.5.1 Generalidades

La apariencia externa de un motor de este tipo se puede observar en la Figura 3.9. La carcasa exterior evita la identificación de sus partes. Sin embargo, todo motor de corriente continua consta de:

- Inductor. Se corresponde con el estator. En este caso, el inductor lo constituyen los imanes permanentes.
- Inducido. Se corresponde con el rotor. Es el devanado de la armadura recorrido por corriente alterna de frecuencia $f=p*N$ donde p es el número de polos del motor y N el número de espiras.
- Circuito externo. Recorrido por corriente continua.

En la Figura 3.9 se puede observar un esquema explicativo.



Figura 3.9 Esquema motor corriente continua.

El funcionamiento del motor eléctrico de continua se basa en el efecto producido por la circulación de corriente por una espira en presencia de un campo magnético. La ecuación que relaciona estas dos magnitudes es la Ley de Laplace:

$$\vec{dF} = I \int \vec{B} \times \vec{dl} \quad (3.6)$$

Donde, \vec{B} es el vector de inducción magnética que atraviesa una determinada sección de la espira, \vec{I} en el sentido de recorrido de la corriente, es el vector intensidad de corriente que circula por la espira, y l es la longitud de la espira.

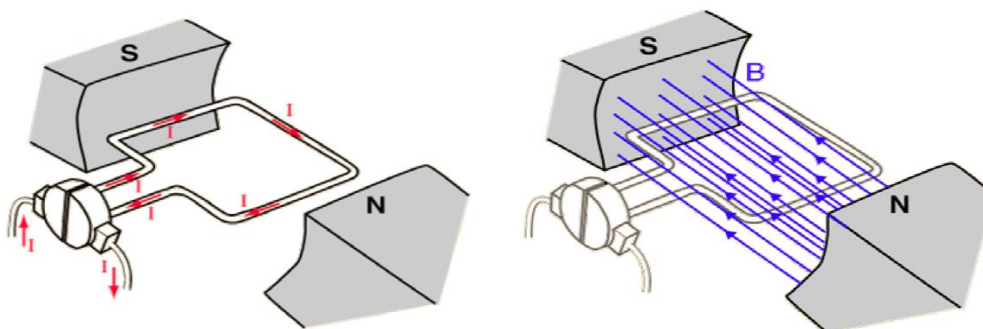


Figura 3.10 Flujo magnético en el motor

Este hecho genera una fuerza en sentido perpendicular a \vec{I} y \vec{B} , y en el sentido que indica la regla de la mano derecha, como se ve en la Figura 3.11.

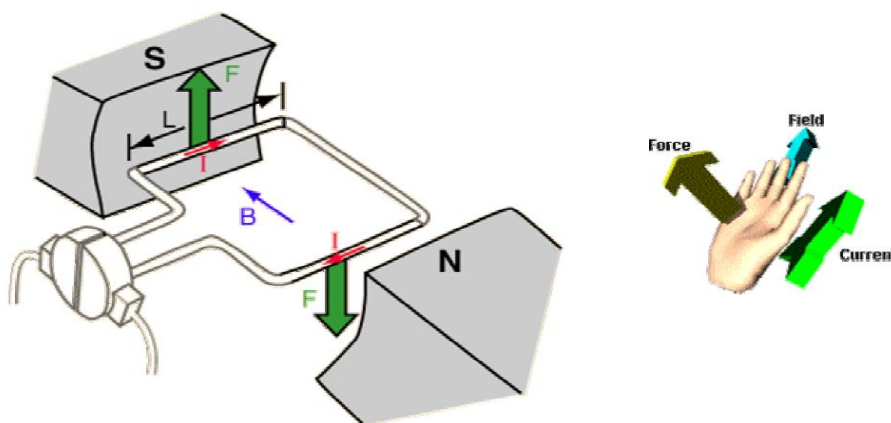


Figura 3.11 Par de fuerzas generado según regla de la mano derecha.

Como consecuencia se genera un par de fuerzas dando lugar a un momento sobre el eje de la espira y provocando así su giro. Dado que la relación entre fuerza y par es proporcional a la distancia de aplicación de la fuerza, el momento generado no es constante sino que tiene máximos y mínimos. Esto se debe al ángulo existente entre la perpendicular a la fuerza y la línea que une el eje de rotación de la espira con el punto de aplicación de la fuerza. Los máximos y mínimos se obtienen al hacerse el $\cos \alpha$ igual a la unidad o nulo respectivamente.

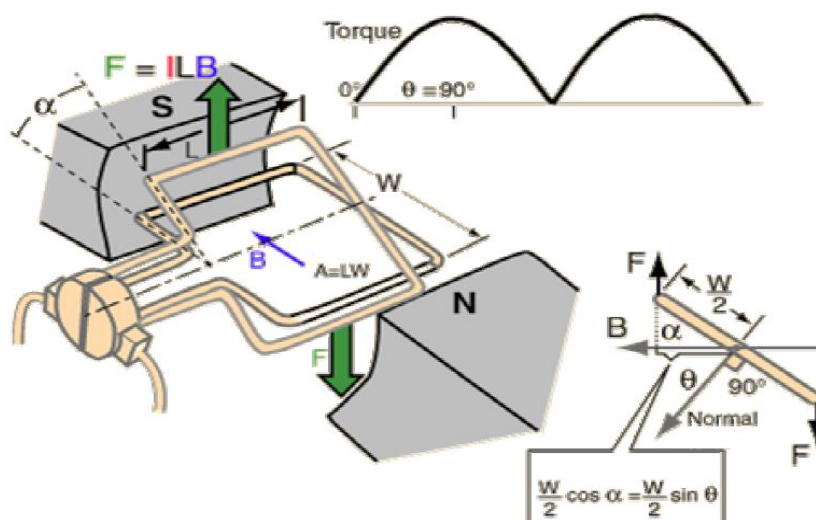


Figura 3.12 Par de fuerzas generado según el ángulo.

Hardware

Esto es el funcionamiento de un motor explicado de una forma somera. El movimiento de esta espira corresponde con el movimiento del eje del motor. Al tratarse de un motor sin escobillas, se evitan pérdidas en forma de calor producidas por la fricción.

De no ser así, se

vería el efecto

observado en la

Figura 3.13, en

la que el paso de

la escobilla

por las

delgas del colector genera una sucesión de picos en la señal mostrada.

Para ciertos aspectos de este proyecto será necesaria una modelización del propio motor como circuito eléctrico (Figura 3.14), de manera que sea posible analizar y actuar sobre él para lograr diferentes efectos.

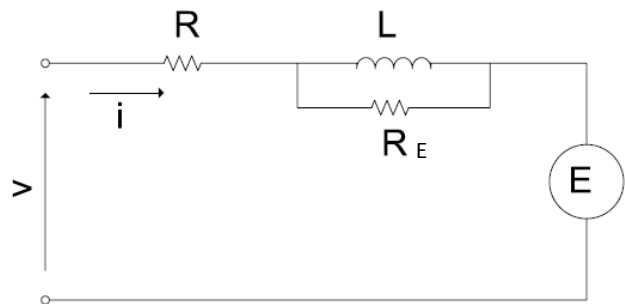
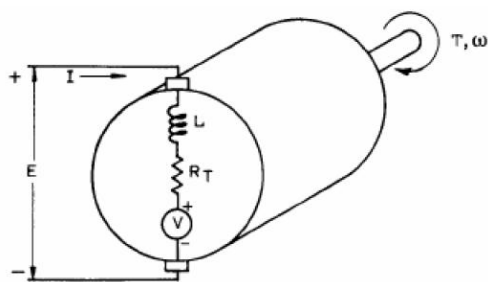


Figura 3.14 Modelo eléctrico de un motor de corriente continua.

Donde:

- R: resistencia de armadura
- L: inductancia de armadura
- E: fuerza contra-electromotriz
- R_E: pérdidas en el núcleo

En el Anexo A3 se estudiará más en profundidad el circuito equivalente aquí expuesto y su modelización y demostración. Con este modelo será posible diseñar el control del motor en corriente, y como consecuencia, en fuerza y par.

En definitiva, el uso de un motor de corriente continua sin escobillas tiene algunas ventajas e inconvenientes que se detallan a continuación y da sentido a la elección de este tipo de motor sobre el resto (dadas las especificaciones).

Ventajas:

- Baja inercia (grandes aceleraciones).
- Pérdidas nulas en el estator y en el hierro del rotor.
- Baja saturación → Linealidad.



Figura 3.13 Efecto de las delgas del colector.

- Baja constante de tiempo eléctrica ($L \uparrow$).
- Bajos pares de retención.
- Relación tensión-velocidad lineal.
- Relación corriente-par lineal.
- Volumen bajo.
- Baja tensión de arranque.
- Menores problemas de mantenimiento del colector.

Inconvenientes:

- Precio elevado.

3.5.2 Función de transferencia del motor

Para poder asegurar que el sistema responde como de él se espera, procedemos a la obtención de la función de transferencia (f.d.t.) tanto teórica como experimental, y comprobaremos que son similares y su respuesta prácticamente idéntica.

Anteriormente se ha indicado la necesidad de modelizar el motor. La razón para realizar esta modelización es tener la posibilidad de diseñar los reguladores de los lazos de control de forma teórica y no simplemente mediante un ajuste empírico. Esto se justificará en más detalle en el capítulo 4.

Para la obtención teórica de la f.d.t. del motor, se hace uso de los datos que proporciona el fabricante sobre dicho motor. Se tiene que la función de transferencia tiene la siguiente forma:

$$G_{motor\ teórica} = \frac{K}{\tau_m s + 1}, \text{ donde } K = \frac{1}{k_E}, \text{ y } \tau_m = \frac{R \cdot J}{k_E \cdot k_M} \quad (3.7)$$

Por lo tanto, la función de transferencia genérica queda de la siguiente forma:

$$G_{motor\ teórica} = \frac{1}{\frac{s \cdot R \cdot J}{k_M} + k_E} \quad (3.8)$$

Donde:

- s: parámetro de Laplace
- R: Resistencia terminal
- J: inercia del rotor
- k_M : constante de torque
- k_E : constante fuerza contra electromotriz

De acuerdo con la hoja de características del motor utilizado (Faulhaber 3257G024C) los valores de cada parámetro son:

$$R = 1,63 \Omega \quad (3.9)$$

$$J = 41 \text{ g cm}^2 = 4,1 \times 10^{-6} \text{ Kg m}^2 \quad (3.10)$$

$$k_M = 0,0377 \frac{\text{N m}}{\text{A}} \quad (3.11)$$

$$k_E = 3,95 \frac{mV}{rpm} \times \frac{1 rev}{2\pi rad} \times \frac{60 s}{1 min} = 0,0377 \frac{V}{rad/s} \quad (3.12)$$

$$\tau_m = 4,7 ms \quad (3.13)$$

Introduciendo estos valores en la expresión general obtenida anteriormente tenemos que:

$$G_{motor\ teórica} = \frac{1}{0,000177s + 0,0377} \quad (3.14)$$

A continuación, se usa Matlab para simular el sistema y poder estudiar el comportamiento dinámico del motor. La herramienta Simulink facilita esta tarea.

Se obtiene la f.d.t. experimental analizando la respuesta del motor ante una entrada escalón unitario. El eje de abscisas es el eje temporal, mientras que las ordenadas corresponden a tensión de salida (Figura 3.15) y velocidad angular en rad/s respectivamente.

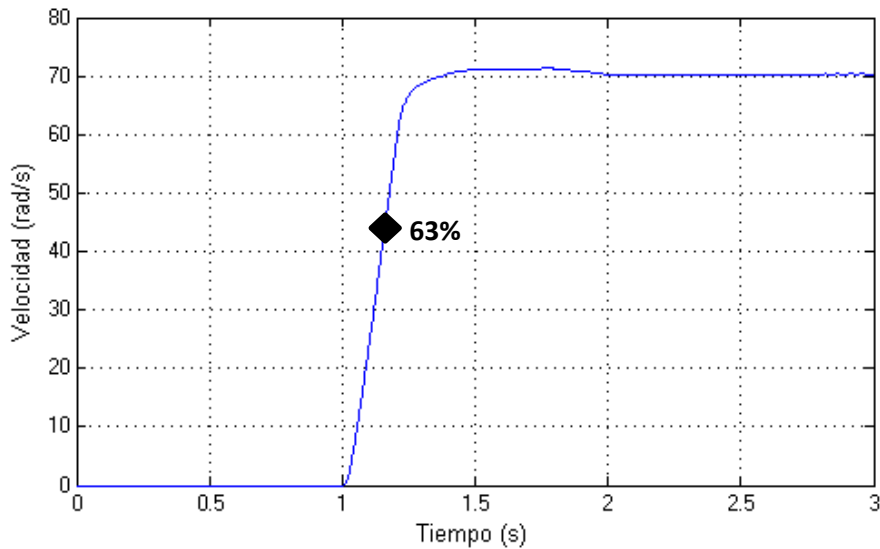


Figura 3.15 Respuesta real del sistema completo ante entrada escalón.

En la Figura 3.15 se observa la respuesta ante entrada escalón unitario del sistema completo. El sistema completo incluye motor y driver, por lo que esta respuesta no puede ser comparada con la deducida teóricamente.

$$G_{exp\ S.C.} = G_{exp\ Driver} \cdot G_{exp\ Motor} \quad (3.15)$$

Según la tabla de regresión (Figura 3.5) cuando se estudió el driver, la ganancia del driver corresponde a 2,99 V/V.

$$G_{exp\ Motor} = \frac{G_{exp\ S.C.}}{G_{exp\ Driver}} \quad (3.16)$$

La constante de tiempo se obtiene de calcular el tiempo que tarda la señal en alcanzar el 63% del valor final (Figura 3.15)

$$70 rad/s \cdot 0,63 = 44,1 rad/s \rightarrow 0,17s \quad (3.17)$$

Según se observa en la Figura 3.15, la constante de tiempo σ_m , corresponde a un valor aproximado de 0,17 segundos. Con estos datos, la f.d.t. del motor, calculada experimentalmente tiene la siguiente expresión:

$$G_{exp Motor} = \frac{K}{\tau_m s + 1} = \frac{70/2,99}{0,17s + 1} = \frac{23,41}{0,17s + 1} = \frac{1}{0,0073s + 0,0427} \quad (3.18)$$

Como vemos la diferencia entre ambas f.d.t. (Ecuaciones 3.14 y 3.18) se hace más palpable si comparamos las constantes de tiempo, 4,7 ms frente a 170 ms. Este hecho se refleja en la respuesta simulada.

Para comprobar la validez del modelo, se simularon ambas f.d.t. para verificar su similitud, como se observa en la Figura 3.16.

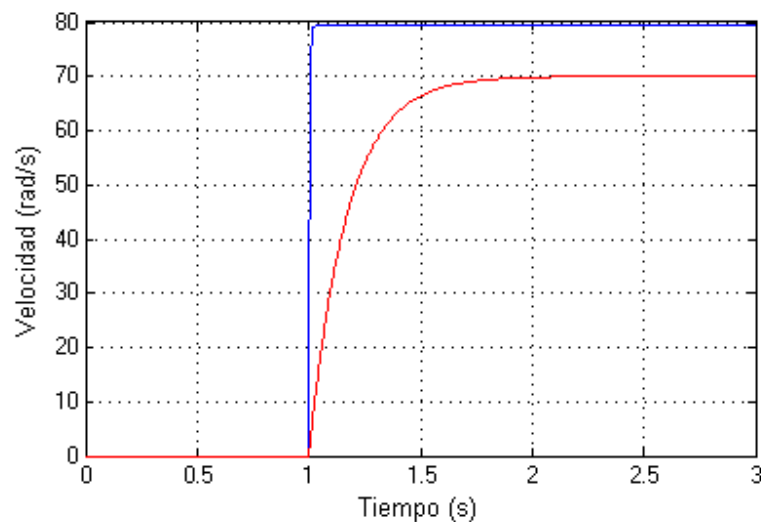


Figura 3.16 Respuesta experimental simulada (rojo) y teórica simulada (azul).

Como se puede apreciar en la Figura 3.16, las respuestas experimental y teórica no presentan dinámicas iguales. La experimental es sensiblemente más lenta. La explicación de este fenómeno está en la respuesta del driver ante una señal escalón de este tipo. El driver, por diseño, tiene una limitación en forma de *slew-rate*, lo que hace que la salida simulada teórica no se ajuste a lo esperado. Para que puedan ser comparadas se debe obtener la función de transferencia del driver y acoplarla a la obtenida del motor. Es decir, no basta con considerar el driver como un sistema de orden 0 con constante proporcional de valor 2,99. En este caso sí serán comparables y

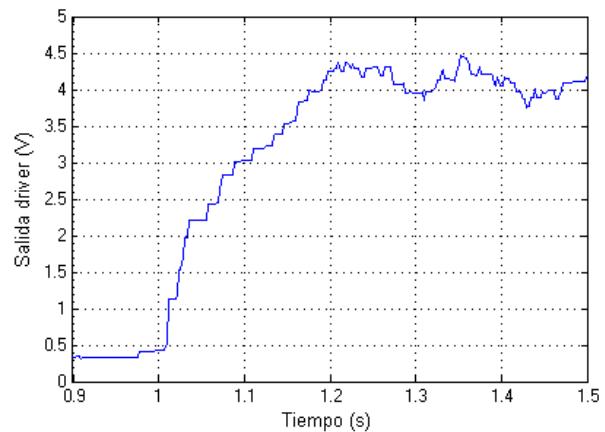


Figura 3.17 Respuesta real driver ante entrada escalón 1V.

Hardware

previsiblemente semejantes.

La función de transferencia del driver se ha calculado de modo experimental a partir de la respuesta real obtenida con una entrada escalón unitario del driver.

$$G_{\text{exp Driver}} = \frac{K}{\tau_m s + 1} = \frac{3.2}{0.16s + 1} \quad (3.19)$$

También se observan diferencias en la ganancia de ambas f.d.t. que pueden ser debidas a factores no incluidos en el estudio.

Anteriormente se ha considerado la f.d.t. del driver como una función de orden 0, tomándose como valor el correspondiente a una entrada de escalón unitario. Se puede observar en la Figura 3.17 que dicha consideración no es correcta, ya que se trata de una f.d.t. de orden 1. El motivo de la consideración, es la tendencia de la respuesta del driver. Como se observa en la Figura 3.17, su similitud con la regresión de la Figura 3.5 queda demostrada. Como se ha explicado en el apartado 3.3, existe un tramo de zona muerta en la que el driver no responde ante la entrada. Si se omite dicha zona, se puede equiparar el resto de la gráfica a una recta, asemejándose a la regresión de la Figura 3.5.

Este factor, junto con la influencia del *slew-rate* del propio driver, hace posible una simulación del sistema completo con mayor precisión y obteniendo resultados más fiables.

Una vez calculada la función de transferencia del driver, se multiplica por la del motor teórica hallada con anterioridad y se obtiene la respuesta del sistema completo, de una forma más ajustada que la obtenida de forma experimental. Se utilizará esta f.d.t. para cálculos teóricos y experimentales.

$$G_{\text{teórica S.C.}} = G_{\text{exp Driver}} \cdot G_{\text{teórica Motor}} \quad (3.20)$$

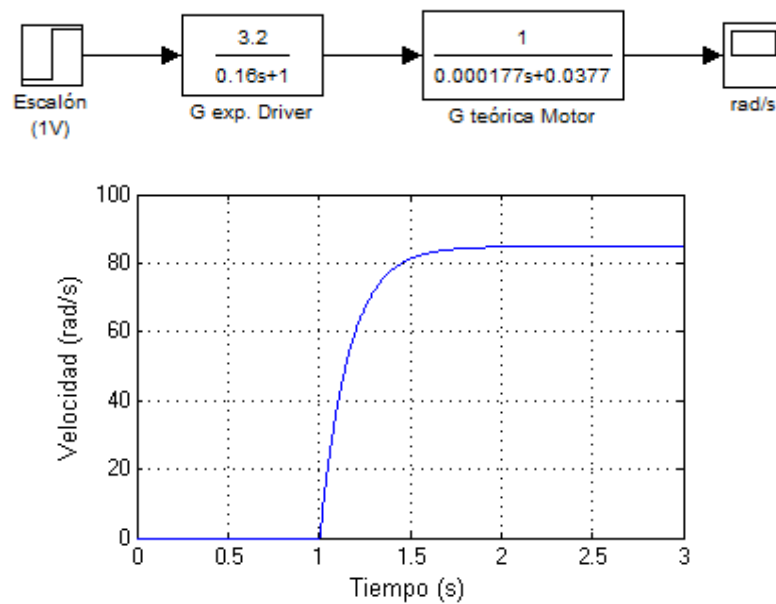


Figura 3.18 Respuesta teórica simulada sistema completo.

Ahora sí es posible comparar la respuesta teórica (driver + motor) con la experimental. Se observa que tienen una dinámica similar con constantes de tiempo similares.

Como queda demostrado, los datos proporcionados por el fabricante, dan una idea de la dinámica del motor, pero constituyen una gran fuente de error si se requiere una precisión alta para el control del motor. Hay muchos otros factores que afectan al comportamiento del motor y que no son considerados en estos estudios realizados por el fabricante. Es el caso de la edad del motor, poco a poco va perdiendo las prestaciones que era capaz de proporcionar en sus primeros instantes de vida. La temperatura ambiente también influye en el movimiento del eje, siendo este más rápido a mayor temperatura. Pero la causa más probable de la diferencia de comportamiento teórico y real es que las hojas de características de cualquier componente eléctrico o electrónico, contienen valores medios, por lo que siempre existirán variaciones de este tipo sin que suponga un error grave. Si este error no fuera tolerable en alguna aplicación determinada, sería imprescindible medir los parámetros necesarios de manera individual y precisa.

Por otro lado, se observan diferencias de ganancia entre la gráfica real y la teórica. Esta diferencia se debe a alguna resistencia no evaluada en el estudio y que hace que la señal de salida no se atenúe tanto como en la realidad. Dicha resistencia tiene su causa probable en los factores anteriormente mencionados, que también influyen en la ganancia.

3.6 Encoder

Este elemento es una de las piezas clave de este proyecto. Se trata de un sensor que permite determinar la posición del eje de un motor. Este sensor, que va acoplado al eje del motor, proporciona en todo momento una información muy valiosa que podemos utilizar para conocer, tanto la posición como la velocidad y controlar el motor por completo. Además, mediante software es posible adecuar esa señal obtenida para extraer otras magnitudes derivadas.

El encoder usado para el motor elegido es el HDEL-5540 A02. Es un encoder incremental de 5 canales. Su funcionamiento no es sencillo. Se puede resumir según el siguiente concepto: un foto-emisor emite un haz de luz que atraviesa un disco óptico perforado. La luz "filtrada" es capturada por un receptor. Dicho fotoreceptor recibe la luz en forma de pulsos, que mediante electrónica embebida en el propio sensor, permite convertir esa información en una cuenta digital. El número de pulsos es la unidad base para poder deducir la posición del eje del motor o la velocidad del mismo.

En el caso de los encoders de 5 canales, existen 2 pares de señales en contrafase y una señal más adicional. La cronología en la captura de estos pares de señales determina el sentido de giro del eje. Este hecho se puede observar en la Figura 3.19.

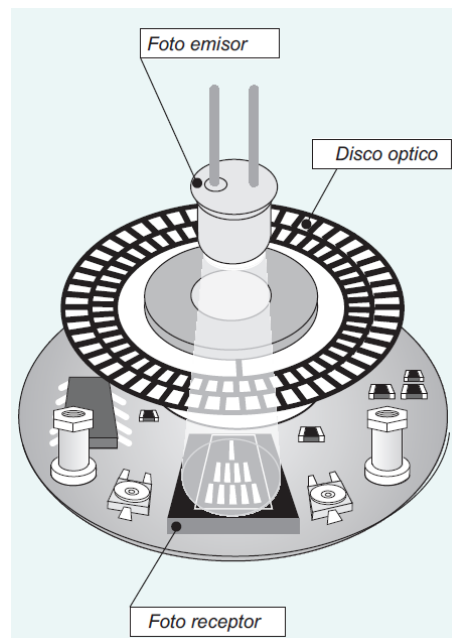


Figura 3.19 Esquema funcionamiento encoder.

La conexión del sensor al eje del motor es complicada y ha de ser minuciosa y cuidada, desaconsejándose totalmente su manipulación sin un conocimiento total del dispositivo. Las conexiones eléctricas son más sencillas, ya que únicamente hay que hacer la conexión de la clema del propio encoder con el conector de la placa de desarrollo.

Este modelo en concreto tiene una característica muy significativa en las industrias que requieren una gran precisión en el control de sus motores. La cuadratura. Es un modo de operación del encoder que multiplica hasta por cuatro los pulsos de conteo, con el consecuente aumento de resolución y la mayor precisión en el control de la posición y la velocidad del motor.

En este proyecto, será el único sensor utilizado, dada la gran variedad de posibilidades que ofrece a partir de un conteo digital de pulsos.

Este tipo de sensor está presente en la mayoría de los

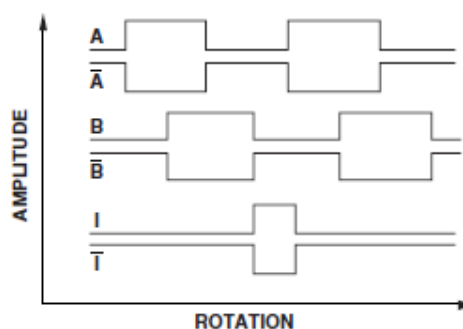


Figura 3.20 Señales encoder

motores instalados en cualquier sistema, más aún si se refiere a sistemas de control.

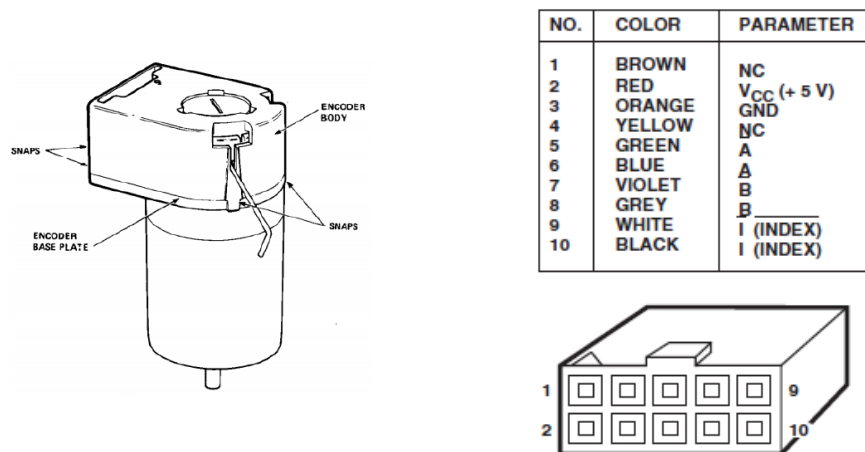


Figura 3.21 A la izquierda, motor+encoder, a la derecha, esquema de conexiones

4 Sistemas de Control

4.1 Introducción

El objetivo de este proyecto es llegar a controlar la dinámica de un motor para poder actuar sobre un exoesqueleto con el fin de ayudar a la rehabilitación de la mano de las personas que lo requieran.

El control de cualquier sistema precisa una serie de elementos dispuestos de una forma premeditada para lograr que su funcionamiento como unidad, dé como resultado una señal de salida dentro de unos rangos aceptables establecidos.

En primer lugar, es necesario modelar el sistema a controlar, y que se denomina planta del sistema. En segundo lugar, es imprescindible un sensor que capte la magnitud que se desea controlar, o en su defecto, una magnitud derivada que pueda ser transformada según los requerimientos del sistema. Por último, es necesario un regulador o controlador, que será específicamente el que actúe sobre la señal de entrada a la planta para que la salida sea la deseada.

Un sistema de control clásico consta de las partes ya mencionadas y tiene el aspecto mostrado en la Figura 4.1.

V_{ref} es la señal de referencia. En este caso, puede tratarse de una velocidad medida en rad/s, una posición medida en radianes, una fuerza medida en Newtons (N), etc.

Con el fin de conocer y evaluar constantemente el estado del sistema, existe una realimentación o feedback que permite el ajuste de la salida. Esto es, la realimentación muestrea la salida del sistema para compararla con la señal de referencia mediante una resta. Esto se denomina error de la señal. En función del resultado obtenido, el controlador corrige la

desviación respecto de la señal de referencia, hasta que el error es nulo o pequeño dentro de unos márgenes establecidos.

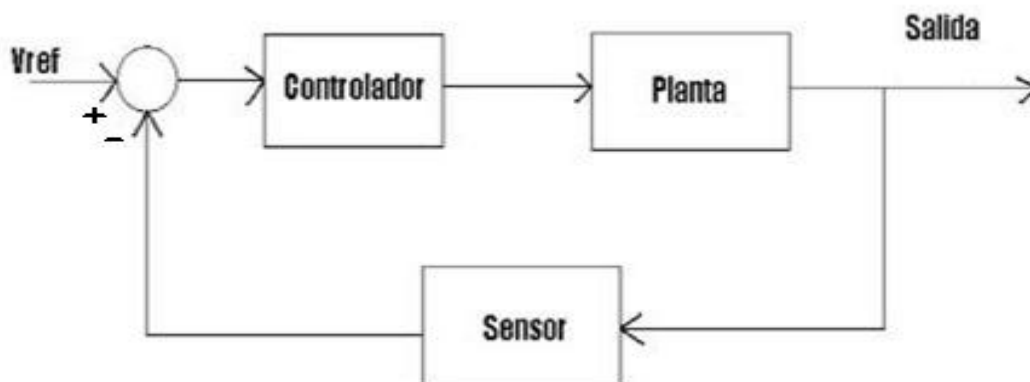


Figura 4.1 Esquema clásico de un sistema de control.

Gracias al cálculo de la función de transferencia de cada sistema diseñado, es posible simular cada uno de ellos antes de realizar las comprobaciones en el sistema real, evitando así posibles errores de diseño. Dichas simulaciones llevan consigo un estudio previo complejo, ya que el sistema real, para ser modelizado en la simulación, debe ser adaptado a las posibilidades del software.

En el caso de los sistemas de control implementados para este proyecto, el sensor será el encoder, y los reguladores serán PID's (Proporcional Integral Derivativo) o alguna de sus variantes. Para las simulaciones, se utilizará la f.d.t. experimental con el propósito de minimizar el error cometido. Puesto que se ha hallado introduciendo una señal de 1V, y midiendo la salida del motor, la función conseguida es la composición de las funciones de transferencia del motor, más la del driver, más todo tipo de fricciones y factores influyentes que son difícilmente cuantificables de forma teórica. A la hora de realizar un diseño de simulación, el sensor queda reducido a un bloque de ganancia unidad (omitido) en la realimentación, de manera que se recircula el valor de la salida para compararlo directamente con el valor de referencia, también medido en las mismas unidades. Esto es así porque la f.d.t. obtenida experimentalmente, relaciona la salida en unidades de velocidad, con la entrada en unidades de tensión. No es así en las simulaciones, donde la f.d.t. total del lazo abierto, compara entrada y salida ambas en las mismas unidades. Por este motivo, la ganancia del lazo de realimentación es adimensional.

Así mismo, hay que tener presente que el sensor no se corresponde exactamente con el encoder, sino que el sensor incorpora un transductor incluido en el diseño del software, de manera que de él se obtenga la magnitud física deseada. Por este motivo, se utilizará un subsistema que engloba, el sensado de la medida de la magnitud en cuestión, más la correspondiente transformación de unidades. De esta manera, se puede simular cada sistema en busca de fallos antes de ser comprobado en el sistema real.

4.1.1 Tipos de control

El campo del diseño de sistemas de control es muy amplio, e incluye multitud de técnicas diferentes, con especificaciones determinadas para cada uno de los sistemas implementados. Existen varias topologías de control que permiten regular la salida de manera fiable. Todas estas metodologías llevan consigo un importante estudio que las ha llevado a ser consideradas como fiables y a la vez fáciles de entender y de implementar.

Cualquier sistema de control puede dar como resultado una salida estable, inestable o críticamente estable. Lo ideal es obtener una respuesta estable ante perturbaciones, y ese es el cometido de los lazos de control.

Método clásico

Es el método más extendido por su sencillez de implementación y su flexibilidad a la hora de configurar el regulador. Se trata de una técnica que inicialmente no es trivial pero que se convierte en muy sencilla cuando la persona se familiariza con ella. En este tipo de control pueden implementarse varios tipos de regulador, según se combinen los parámetros proporcional, integral y derivativo. El primero de ellos ajusta la salida multiplicando el error por una constante, lo que hace que el error se reduzca rápidamente a valores muy bajos. A menudo se excede un cierto límite para el que la salida sobrepasa el valor deseado, produciéndose sobreoscilación. La constante integral, intenta eliminar o disminuir el error en régimen estacionario, integrando el error. A veces se dice que lo promedia. Por último, la función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente. Con estos tres parámetros, o incluso prescindiendo de alguno de ellos, se consigue estabilizar la señal de salida manipulando la dinámica del sistema para lograr la respuesta deseada.

Cancelación de pares polo-cero

Es una técnica también muy extendida pero con más limitaciones que el método clásico. En cambio, se considera más intuitivo que la sintonización de reguladores PID, ya que puede tenerse una idea continuada de las acciones sobre el sistema. Se basa en obtener la localización del polo dominante, para anular su efecto mediante un cero ficticio, y “recolocar” el polo en una posición que sea ventajosa de cara a la respuesta dinámica del sistema. Además se incorpora una constante proporcional que permita el ajuste de ganancia del controlador. La simpleza de esta técnica se contrapone a los posibles problemas que se generan. Se engloban en uno, y es que la cancelación del efecto de un polo con un cero, debe ser muy precisa, ya que de lo contrario, el sistema puede volverse inestable. El problema está en que la cancelación nunca es perfecta, por lo que hay que ser metódico a la hora de colocar el cero del regulador. Por otro lado, el polo del regulador ajustará la rapidez del sistema.

Lógica difusa

Se pretende que la señal fluya por un circuito en el que se le obligue a elegir entre diferentes caminos conforme a la toma de decisiones según su valor. Se trata simplemente de un árbol de decisión, tras el cual, según el camino seguido, la señal sea tratada de una forma o de otra. Es

una técnica útil a bajo nivel, pero que resulta compleja a medida que el control se hace más complicado. Además, no tiene la limpieza que tienen los otros dos métodos una vez implementado, aunque permite un ajuste más perfeccionado del lazo de control, ya que es posible implementar tantos casos de actuación como se desee. Esto hace de la *fuzzy logic* un método no tan extendido como el clásico pero que en determinadas ocasiones puede ser muy ventajoso.

A continuación, se va a proceder al estudio y diseño de diferentes controles con las técnicas ya comentadas. Se estudiarán los controles de posición, velocidad y fuerza, y todo el *know-how* que llevan asociado.

4.2 Medida de velocidad

Uno de los primeros pasos que hay que dar a la hora de controlar experimentalmente un motor es ser capaces de medir la velocidad del eje del motor y su respuesta ante variaciones de tensión.

El elemento que nos permitirá hacerlo es el encoder, que como ya se explicó en el capítulo 3, este sensor nos da información de los pulsos que cuenta durante el movimiento del motor. Por ello, esta información es de utilidad pero hemos de transformarla hasta obtener la magnitud que necesitamos, en este caso, la velocidad de giro del eje.

El objetivo es por tanto el cálculo de la velocidad de giro (rad/s) a partir de la información proporcionada por el encoder. El esquema implementado es el siguiente (Figura 4.2).

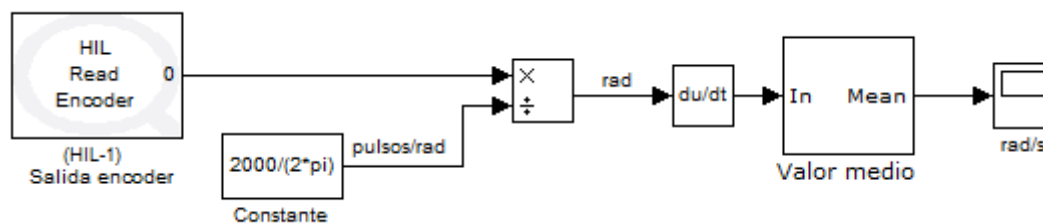


Figura 4.2 Esquema de medida de velocidad a partir del encoder.

El bloque *HIL Read Encoder* es un bloque propio de la librería de QuaRC asociada a Simulink que permite leer los pulsos contados por el encoder. Atendiendo al modo de cuadratura fijado para el sensor (x4, configurable en el propio bloque), tenemos que cada revolución del eje supone 2000 pulsos contados, ya que la resolución del encoder es de 500 pulsos/rev y por tanto:

$$Constante = 2000 \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}} \times \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} = \frac{1000}{\pi} \text{ pulsos/rad} \quad (4.1)$$

Los pulsos medidos directamente con el bloque *HIL Read*, dividido por el valor anterior, proporciona el ángulo en radianes que ha girado el eje, por lo que sólo queda calcular la velocidad. Debemos pues calcular los pulsos en un incremento infinitesimal de la unidad de tiempo, dando como resultado la velocidad instantánea de rotación del eje del motor. Para ello únicamente hay que derivar respecto del tiempo, obteniendo así un valor medido en rad/s, que es la magnitud buscada.

Como posible mejora se ha incorporado un bloque que calcula la media de los valores que le llegan con una frecuencia f determinada. Es preciso indicar que esta mejora es notable cuando el objetivo es únicamente conocer la velocidad del eje del motor, pero no así cuando se pretende controlar dicha velocidad con una consigna. Esa frecuencia f mencionada, hace que la realimentación en el control de velocidad se haga inestable, pues f y la frecuencia de muestreo del sistema son distintas. Este hecho tiene su causa en que el regulador del control es mucho más rápido que la frecuencia de muestreo de la realimentación, por lo que la señal de error no es exacta, y lleva al regulador a incrementar la señal de entrada a la planta del sistema. En el instante en el que la señal de muestreo se actualiza, el valor de la señal de error ya se ha disparado, provocando la inestabilidad.

Existe un pequeño matiz que ha de ser apuntado. La velocidad así medida no es instantánea, sino que se trata de una velocidad media en un intervalo de tiempo determinado. El intervalo de tiempo utilizado para calcular la media, corresponde a la inversa de la frecuencia propia del bloque, que es un parámetro configurable en el diseño.

4.2.1 Ensayo

Teniendo en cuenta la función de transferencia calculada en la sección dedicada al motor en el capítulo de hardware (Capítulo 3), podemos realizar tanto un ensayo simulado como uno real.

La función de transferencia teórica del motor, es la siguiente:

$$G_{motor\ teórica} = \frac{1}{0,000177s + 0,0377} \quad (4.2)$$

Junto con la función de transferencia, en este caso real, del driver:

$$G_{exp\ Driver} = \frac{K}{\tau_ms + 1} = \frac{3.2}{0.16s + 1} \quad (4.3)$$

Ambas f.d.t. nos permiten simular la medida de velocidad. Dicha respuesta se muestra en la Figura 4.3.

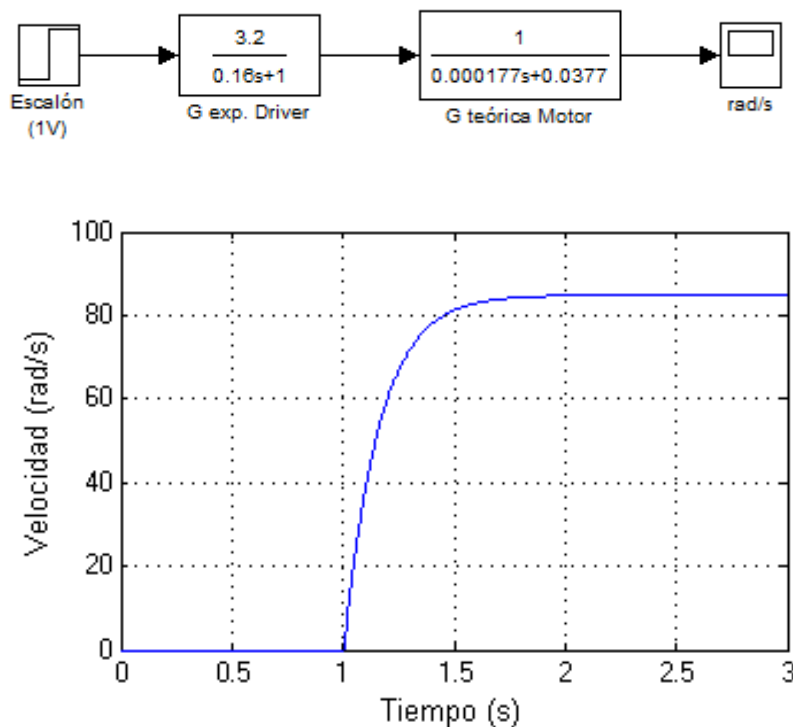


Figura 4.3 Respuesta teórica simulada sistema completo.

Como se observa en la Figura 4.3, la f.d.t. teórica del sistema completo es una función de segundo orden subamortiguada, mientras que la f.d.t. experimental se ha aproximado a una de orden 1.

En la Figura 4.4 se observa la respuesta real ante entrada escalón unitario. Se puede ver como en este caso, la respuesta real está levemente sobreamortiguada.

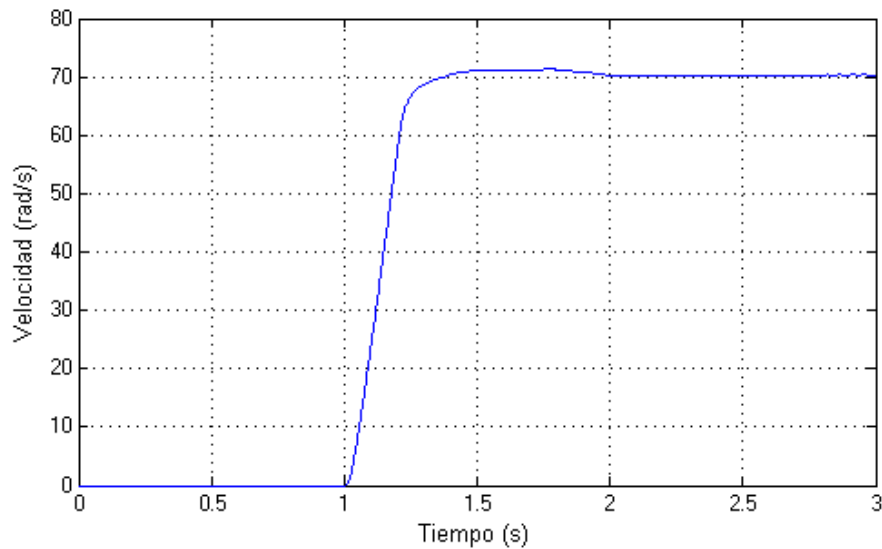


Figura 4.4 Respuesta del motor ante entrada escalón unitario.

A la vista de la Figura 4.4 y de la Ecuación 4.4, la constante de tiempo es de 2,43 ms y la ganancia $70 \frac{\text{rad/s}}{\text{V}}$. Con estos datos, y como se estudió en el capítulo 3, se obtiene la función de transferencia del sistema completo, de forma gráfica. Como ya se ha comentado, la aproximación se hará a una función de orden 1.

$$G_{\text{exp.s.c.}} = \frac{K}{\tau_m s + 1} = \frac{70}{0,17s + 1} = \frac{1}{0,00243s + 0,01428} \quad (4.4)$$

Ambas señales son similares en la forma de la señal respuesta, pero no así comparando sus funciones de transferencia. Además, existen leves diferencias en cuanto a constantes de tiempo y ganancia. Dicha diferencia se debe en gran parte, además de lo explicado cuando se demostró la función de transferencia, a que en el caso del driver, la f.d.t. se ha obtenido de manera gráfica a partir de una señal con bastante ruido, por lo que la toma de dato no es tan precisa como debería ser.

La forma más interesante para analizar la respuesta dinámica de un sistema es analizarla con una señal de entrada cuadrada, que permite observar la dinámica ante entrada positiva y negativa. Este método es especialmente útil cuando el sistema consta de motores.

En la Figura 4.5 se observa la respuesta real ante un tren de pulsos de 1V (señal cuadrada) y frecuencia 0,2Hz:

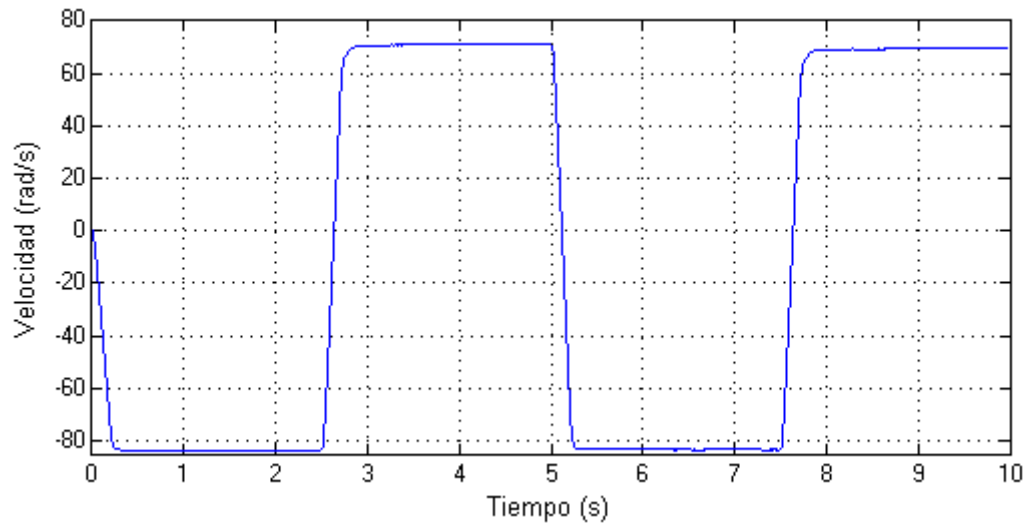


Figura 4.5 Respuesta del motor ante pulsos de 1V y 0,2Hz.

Como se ve en la Figura 4.5, la dinámica del sistema no es idéntica ante entradas positivas y negativas. En el caso de los motores, se debe a los diferentes grados de fricción al girar en un sentido o en otro. Como consecuencia, se puede apreciar como los valores de estabilización de la velocidad, son diferentes, siendo mayor la velocidad alcanzada en el sentido de la entrada negativa, que en el positivo. Anteriormente se ha mencionado que esta fricción tiene relación con factores como la temperatura o la edad del motor, por lo que los valores de estabilización de velocidad del motor pueden variar ligeramente.

Con los datos aportados y el análisis elaborado, se puede concluir que el sistema diseñado para la medición de velocidad del motor, es fiable, y responde, en buena medida, a los valores de los cálculos previos simulados.

4.3 Medida de posición

Otro de los pasos esenciales para el control de un motor es la medición de la posición del eje. Posición y velocidad van íntimamente ligadas por lo que su medida se trata de dos procesos prácticamente simultáneos.

Como en la medida de velocidad, el encoder será de nuevo el sensor, proporcionando, como ya se ha explicado, un número de pulsos contados en función del movimiento del eje. La medida de posición es aún más sencilla, puesto que el número pulsos detectado por el sensor es en sí una unidad de posición. Lo único que se debe hacer es convertirla en la unidad que nos interese, en este caso radianes (rad).

El esquema implementado en la Figura 4.6, es similar al de velocidad con la excepción de la derivada respecto de la unidad temporal.

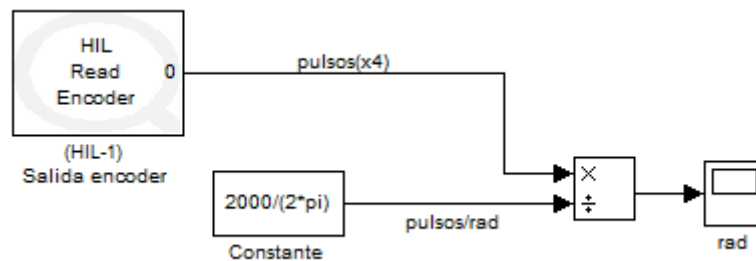


Figura 4.6 Esquema de la medida de posición del eje del motor.

Una vez más el bloque HIL Read Encoder permite leer los pulsos contados por el encoder. Debido al modo de funcionamiento del encoder elegido, x4 de cuadratura, se tiene el mismo cálculo que para el caso anterior:

$$Constante = 2000 \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}} \times \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} = \frac{1000}{\pi} \text{ pulsos/rad} \quad (4.5)$$

Esta constante nos permite transformar la medida de posición según el número de pulsos que cuenta el encoder, en ángulo medido en radianes girado por el eje del motor. El número de pulsos dividido por la constante hallada nos da como resultado el número de radianes que ha girado el eje del motor desde un determinado instante de tiempo. Se optó por la magnitud en términos globales y no por revolución del eje, por lo que cada 2π radianes aproximadamente el eje habrá dado un vuelta completa. De esta manera favorecemos ciertos cálculos a la hora de implementar alguno de los controles necesarios.

4.3.1 Ensayo

De nuevo procedemos al ensayo de dicho diseño y una vez más partiendo de lo visto en la sección dedicada al motor en el capítulo de hardware (capítulo 3). Se realizarán tanto un ensayo simulado como uno real.

$$f dt = \frac{K}{\tau_m s + 1} = \frac{70/2,99}{0,17s + 1} = \frac{23,41}{0,17s + 1} = \frac{1}{0,0073s + 0,0427} \quad (4.6)$$

En la Figura 4.7 se observa la respuesta real ante entrada escalón unitario.

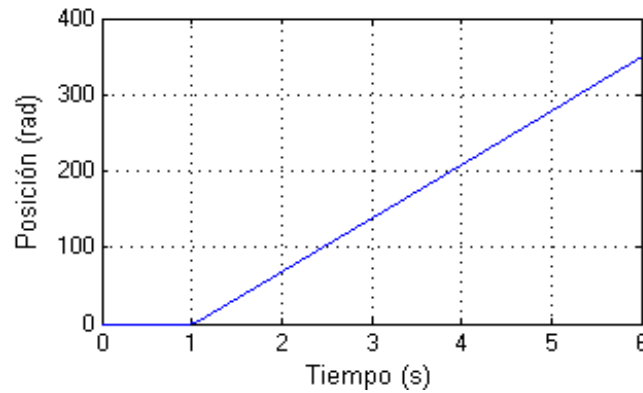


Figura 4.7 Respuesta en posición del sistema real ante entrada escalón unitario.

Hay que destacar que este ensayo se ha de realizar en vacío. La respuesta es correcta y predecible, ya que al alimentar al motor con un escalón de un voltio, el motor girará a una velocidad constante, y por tanto, durante el tiempo que dure el ensayo, la posición respecto al tiempo será una función lineal de pendiente positiva.

Para comprobar que en realidad el modelo es correcto, se hace una pequeña prueba en la que sin alimentar el motor, se gira el eje una revolución completa. En efecto la respuesta del sistema es de 6,28 radianes (2π), lo que demuestra que el diagrama de bloques implementado funciona tal y como se esperaba.

Esta respuesta se adapta a la prevista según la simulación, de acuerdo a la f.d.t. obtenida del sistema, cuya gráfica se muestra en la Figura 4.8. Como se puede ver, existe una pequeña diferencia que puede ser debida a la imprecisión en la función de transferencia experimental.

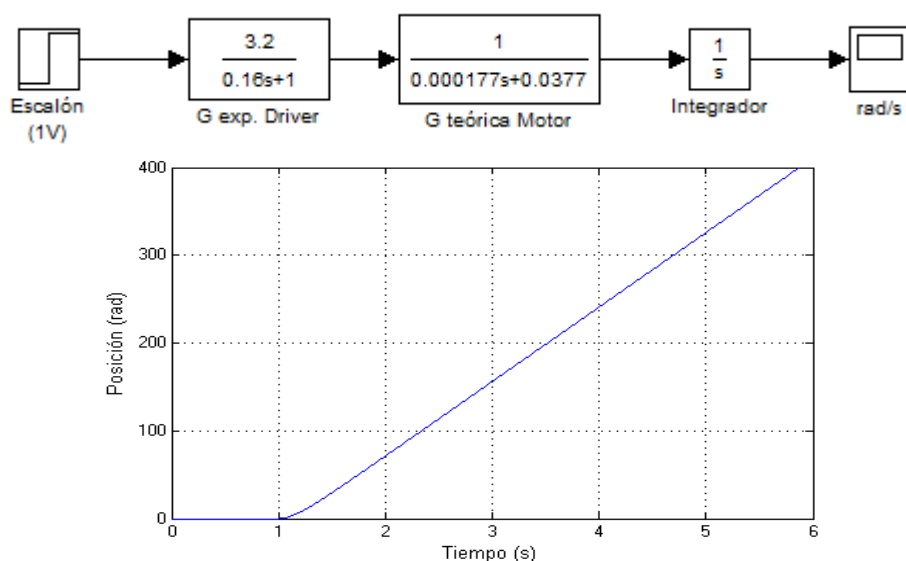


Figura 4.8 Respuesta en posición simulada del sistema ante escalón unitario.

Sistemas de Control

Como se puede apreciar en la Figura 4.8, las diferencias con la gráfica de la Figura 4.7 son muy pequeñas. Éstas son debidas a los factores ya comentados en el apartado de la medida de la velocidad, como son la temperatura, error en la obtención de las funciones de transferencia del motor y del driver, o cualquier otro factor de poca influencia que genera una desviación como la observada respecto del comportamiento real del sistema.

4.4 Control de velocidad

Uno de los pasos necesarios para llegar a controlar la dinámica del motor, es controlar la salida en velocidad. El objetivo es controlar la velocidad del motor ajustándose a un valor de referencia que será configurable por el usuario. El procedimiento será el siguiente: realización de un estudio acabado en simulación, y posteriormente, realización de ensayos sobre el sistema real para la validación del diseño.

Como ya se ha mencionado anteriormente, existen diferentes topologías de control. A continuación se va a profundizar en el control de velocidad mediante técnicas clásicas (reguladores PID) y mediante cancelación de pares polo-cero.

4.4.1 Control clásico

Esta metodología de control es la más extendida. El sistema completo tiene la misma configuración ya vista de un sistema de control clásico (Apartado 4.1).

El primer paso necesario para controlar el sistema, es el estudio del mismo, y de los dispositivos disponibles. Cuando se disponga de toda la información necesaria, se procederá al diseño de los sistemas de control para, en último lugar, ser ensayados sobre el sistema real y analizar su comportamiento.

Simulación

La simulación de los sistemas permite calibrar de forma aproximada los distintos parámetros de manera que no peligren los dispositivos reales si hubiera algún error de diseño o de calibrado. El esquema es el siguiente:

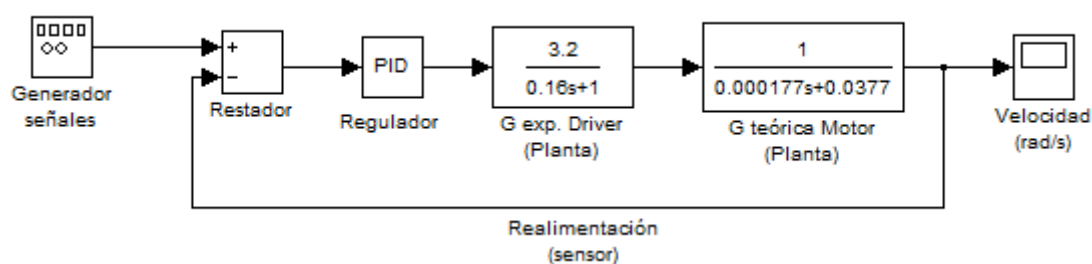


Figura 4.9 Esquema control clásico de velocidad con f.d.t. teórica.

En la Figura 4.9 se muestra el esquema de control clásico implementado. Como se puede apreciar, está compuesto por un generador de señales, un restador, un regulador, una planta, un lazo de realimentación (ganancia unidad) y una salida en velocidad.

El generador de señales está configurado para dar una señal de entrada cuadrada, con amplitud de 100 rad/s y frecuencia de 0,2Hz. Ambos parámetros son elegidos por el diseñador y son accesibles editando el propio bloque. Los motivos de estos valores vienen de la experiencia adquirida en las reiteradas simulaciones realizadas. La frecuencia debe ser

suficientemente baja para poder obtener la respuesta del sistema estabilizada. De ser más alta, podría resultar en un sistema inestable, ya que tardaría mucho en mostrar esta circunstancia ante una simulación temporal ante señal cuadrada, aparentando ser estable. En cuanto a la amplitud, el único requisito contemplado es que no debe ser demasiado baja (velocidad) para impedir que el ensayo se vea afectado por la resistencia inicial a girar del eje. Es importante realizar los ensayos, que más adelante serán comparados entre sí, con la misma configuración de la señal de entrada.

La planta de este esquema (Figura 4.9), es la formada por los bloques del driver y del motor. Ambos en conjunto son el sistema a controlar. Como ya se ha comentado anteriormente en el capítulo de *hardware*, la función de transferencia del motor es la deducida a partir de los valores de las hojas de catálogo del fabricante. Sin embargo, la del driver se trata de una aproximación experimental. Esto se debe a las dificultades de estimar una función de transferencia teórica. No obstante, ya se comprobó la validez de la función calculada, por lo que puede ser aceptada como válida.

El sensado del lazo de realimentación, como se observa en la Figura 4.9, tiene ganancia unidad. Como también ha ido ya explicado, en el sistema real no será así, ya que en este último, el lazo muestrea velocidad pero compara tensiones. Este es el motivo por el que en el ensayo real, el lazo deberá ser capaz de transformar velocidad en tensión.

El restador es el encargado de calcular el error existente entre la salida sensada y el valor deseado (referencia). Se trata de un bloque sumador (en este caso restador) que proporciona la señal de error que a su vez, será la entrada al regulador.

Por último, se encuentra el regulador. Como su propio nombre indica, es el encargado de regular la salida de manera que se obtenga el valor requerido. En los sistemas de control clásicos, el regulador es un PID. El diseño de un buen control del sistema tiene como punto clave la sintonización de los parámetros del PID, por lo que su estudio está explicado en [14], [15] y [16]. La fórmula basada en ganancias para un PID es:

$$PID = P + \frac{I}{s} + D \cdot s \quad (4.7)$$

Según lo explicado en [14] - [16] sobre la sintonización de reguladores PID, junto con la forma de la señal de salida y la fórmula general usadas para los reguladores (Ecuación 4.7), los valores más adecuados son $P=0.025$, $I=0.15$ y $D=0$. Esto significa que el regulador que permite el control del sistema según las especificaciones, no es un PID, sino un regulador PI.

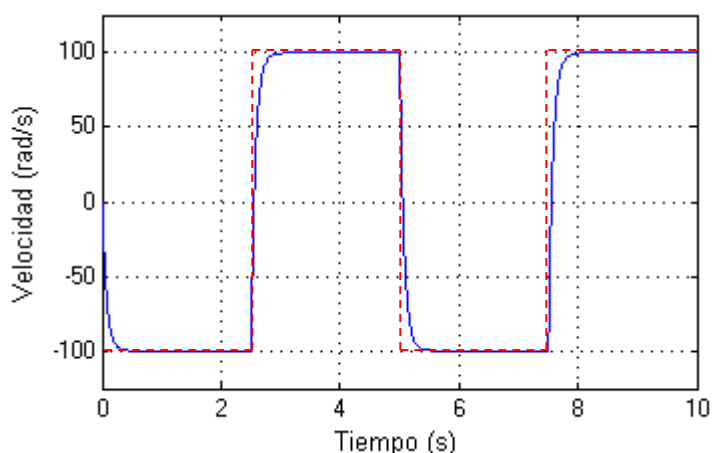


Figura 4.10 Respuesta velocidad método clásico (teórica).

En la Figura 4.10 se muestra la respuesta simulada del esquema de la Figura 4.9. Como se observa en dichas figuras, se ha intentado que la aceleración no sea demasiado elevada para no producir daños en el motor.

Se ve como el sistema se estabiliza perfectamente en la velocidad estipulada como referencia, y que lo hace en un tiempo acorde a las especificaciones ya comentadas de la aceleración.

Por tanto, se ha conseguido controlar el sistema en velocidad, adecuando el tiempo de establecimiento. Se debe tener en cuenta que el sistema es de orden 2, por lo que puede sobreoscilar en función de la sintonización del regulador. En este caso se busca un sistema sobreamortiguado, en el que la velocidad no presente picos que excedan la velocidad de referencia, pudiendo perjudicar el funcionamiento del sistema en la aplicación para la que está diseñada.

Otra forma de verificar el control y asegurarse del correcto diseño, es este segundo esquema de control. Se trata de la misma técnica pero en este caso se opta por la función de transferencia de la planta, hallada de manera gráfica.

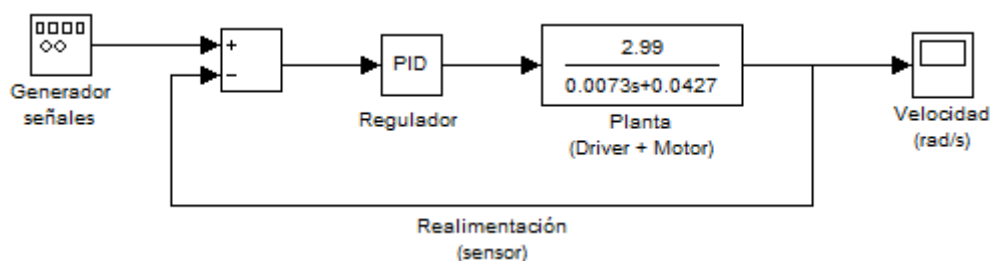


Figura 4.11 Esquema control clásico de velocidad con f.d.t. experimental.

En la Figura 4.11 se observa el esquema de control similar al de la Figura 4.9, pero en este caso la planta consta de un único bloque que incluye el driver y el motor. Esto se debe a que esta planta es la calculada de forma gráfica a partir de la respuesta del sistema ante entrada escalón unitario (1V).

Comparando la respuesta de ambos esquemas, se puede obtener una idea más concreta del comportamiento dinámico del sistema.

Dicho esquema consta de los mismos elementos que el esquema de la Figura 4.9, con la excepción de la planta, como ya se ha indicado. La otra diferencia radica en la sintonización del regulador PID. Previsiblemente, al tratarse de dos plantas iguales

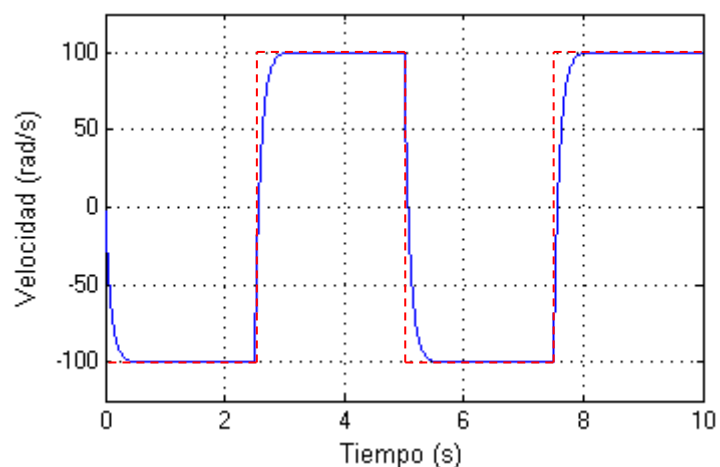


Figura 4.12 Respuesta velocidad método clásico (experimental).

calculadas de diferente manera, la regulación cabe esperar que también sea distinta. Para ello se analizará esta circunstancia.

Para poder realizar una comparación razonable con el modelo anterior, la sintonización debe ser la misma. Por ello, el regulador se trata de un PI ($P=0.025$, $I=0.15$ y $D=0$).

En esta ocasión, con la sintonización idéntica a la de la simulación anterior, se verifica una vez más que la función de transferencia teórica (Figura 4.10), se aproxima de una manera ajustada al comportamiento de la f.d.t. calculada gráficamente (Figura 4.12). Ganancia y tiempo de establecimiento prácticamente idénticos así lo demuestran. Sólo es necesario cotejar los resultados con un ensayo real del regulador implementado.

Ensayo

Una vez realizado el estudio previo y sus correspondientes simulaciones, se procede al ensayo real para verificar la validez de los sistemas de control implementados. Para ello, es necesario realizar de nuevo un esquema de control.

Como ya ha sido mencionado en ocasiones anteriores, este esquema difiere de los esquemas de las Figura 4.9 y Figura 4.11 debido a la estructura del hardware. Adquiere la forma mostrada en la Figura 4.13.

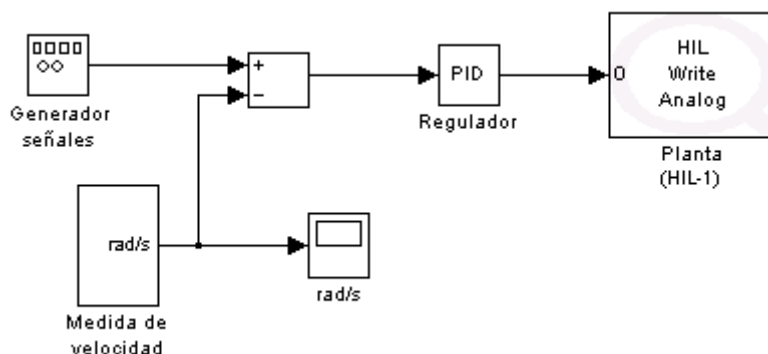


Figura 4.13 Esquema de control clásico real de velocidad con regulador PID.

Como se observa, la principal diferencia está en el lazo de realimentación, que en este caso no aparece explícitamente como tal. El motivo reside en la configuración del hardware.

En el esquema de simulación, no existe ningún bloque que actúe de sensor, sino que es el propio lazo de la realimentación el que extrae la medida de velocidad de la salida del sistema, y la compara con la señal de referencia. Esto es así porque las unidades muestreadas y las comparadas son las mismas.

Este hecho no ocurre en el esquema del sistema real. El encoder muestrea la salida, que mediante una serie de transformaciones ya descritas, se transforma en velocidad (rad/s). Ese es en realidad el lazo de realimentación, pero está implícito en el esquema. Esta magnitud debe ser comparada con la señal de referencia medida en las mismas unidades. Entre tanto, el lazo no se refleja en el esquema, sino que está implementado de forma interna en la placa de

desarrollo. Esto es, en el bloque Planta (HIL-1) se introduce la salida del regulador, que mediante la placa de conexiones, amplifica e introduce a su vez esta señal en el driver y en el motor, devolviendo en forma de realimentación, la señal capturada por el encoder.

En cuanto al resto de bloques del esquema, únicamente es preciso destacar el bloque denominado “Medida de velocidad”. Se trata de un subconjunto que alberga en su interior el esquema diseñado para la medida de velocidad (apartado 1 de este mismo capítulo). La sintonización del PID es igual al de la simulación, para obtener una comparación válida.

En la Figura 4.14 se puede observar la respuesta del sistema real con el regulador implementado anteriormente mediante análisis y simulaciones.

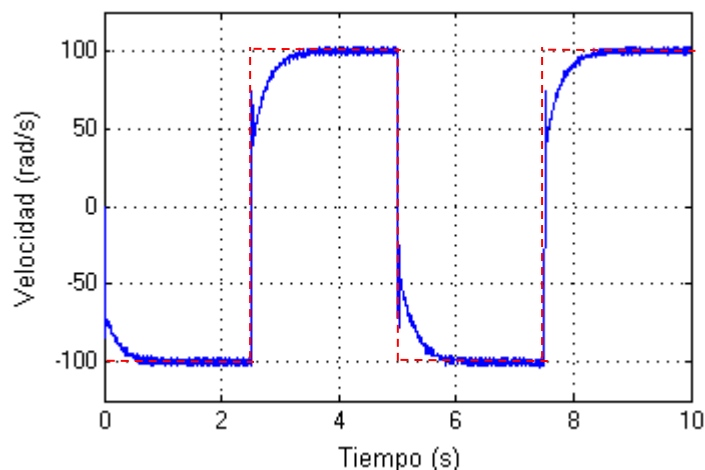


Figura 4.14 Respuesta de velocidad real (Método clásico).

Como se ve, la dinámica es similar, con diferencias mínimas. La señal se estabiliza perfectamente, tal y como se obtenía en las simulaciones, al valor de referencia. En cuanto a la forma de la señal, se verifica que el tiempo de estabilización es también del mismo orden de magnitud. Por todo ello, queda demostrado que el sistema de control diseñado funciona correctamente en el sistema.

Sin embargo, existen dos factores que no deben pasar desapercibidos. Uno de ellos es el pico observado en los flancos de subida y bajada. Este pico tiene lugar debido a que como ya se ha explicado, el sistema real es un sistema de orden 2 o superior, por lo que ese pico en realidad se trata de una sobreoscilación (Figura 4.15). Como es lógico, cualquiera de las simulaciones realizadas anteriores a este ensayo, son meras aproximaciones, por lo que es esperable que el comportamiento real no sea idéntico al simulado. Del detalle mostrado en dicha figura también se extrae la aceleración inicial del motor, que es bastante acusada, aunque tras la sobreoscilación, se ralentiza para llegar a estabilizar.

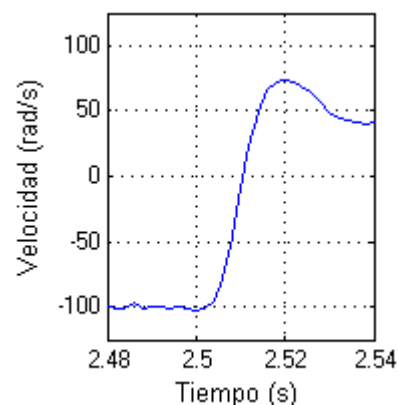


Figura 4.15 Detalle sobreoscilación respuesta real.

El otro de los factores es el “ruido” durante el tramo en el que la señal se estabiliza. Esas pequeñas oscilaciones tienen su origen en el funcionamiento del regulador. El regulador llega al valor de referencia, pero no es capaz de fijarlo con exactitud, sino que existen desviaciones. En cuanto la desviación se hace positiva, la señal de error también es positiva, por lo que el PI actúa para contrarrestar dicha variación. En un sistema ideal en el que la frecuencia de muestreo y la frecuencia de evaluación del error, esas fluctuaciones para corregir dicho error serían minúsculas, dando una apariencia de señal constante.

A continuación se va a analizar otro método de control, el de cancelación de pares polo-cero, basado también en el denominado control clásico.

4.4.2 Cancelación polo-cero

La técnica de control basada en cancelaciones de polos y ceros, permite variar de una forma sencilla la dinámica del sistema. La idea principal es conseguir polos dominantes que determinen la respuesta del sistema, haciendo que la influencia del resto de polos sea despreciable frente al dominante.

Esta técnica, a priori sencilla, puede causar inestabilidad en el sistema. El motivo de esta circunstancia reside en que la cancelación polo-cero, ha de tener una gran precisión para que sea efectiva, y no se obtenga un punto de divergencia del sistema. En los sistemas reales, esta cancelación es prácticamente imposible, por lo que se busca que ambos, el polo y el cero, estén lo más cercanos posible y evitar así los problemas mencionados. No ocurre lo mismo en el diseño de sistemas de control de modo teórico, en los cuales las cancelaciones son exactas.

El problema descrito se aprecia de forma muy clara en [14], [15].

Las ramas del lugar de las raíces van del polo al cero o del polo al infinito, lo que explica que si no se cancelan exactamente, puede dar lugar a una nueva rama que acabe en el infinito, pudiendo provocar la inestabilidad del sistema.

Simulación

A continuación se procede al diseño del esquema de control basado en esta técnica.

Tras lo visto en los diseños anteriores por el método clásico, y teniendo en cuenta lo ya mencionado sobre las diferentes opciones de control (P, PI, PD, PID) se construye en siguiente esquema de control (Figura 4.16):

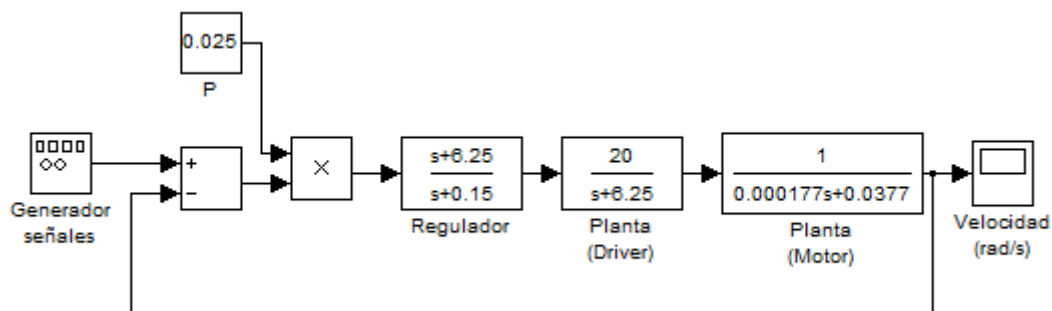


Figura 4.16 Esquema control de velocidad por cancelación polo-cero con f.d.t. teórica.

Como se puede observar, se ha considerado en primera instancia, la función de transferencia teórica del motor, tal y como se hizo en el apartado de control clásico.

Se trata del mismo esquema de simulación de la Figura 4.9, con la única diferencia del regulador. En este caso, el regulador cancela el polo más cercano al origen, es decir, el polo del driver.

$$p_{Driver} = -6,25 \quad (4.8)$$

$$G_{teórica\ Motor} = \frac{1}{0,000177s + 0.0377} = \frac{5649,7}{s + 213} \rightarrow p_{Motor} = -213 \quad (4.9)$$

Como se ve en la ecuaciones 4.8 y 4.9, ambos polos están muy distanciados, por lo que la decisión de qué polo cancelar parece obvia. Podría cancelarse el polo más lejano pero puede resultar que el otro no sea despreciable frente a la influencia del dominante que se haya elegido.

Conforme a estas premisas, el regulador deberá tener un cero en idéntica posición que el polo a cancelar, y un polo en la posición necesaria para obtener la dinámica necesaria. Esta posición vendrá determinada por la respuesta que se desee obtener. En cuanto a polos (en el semiplano izquierdo), la dinámica será más lenta cuanto mayor sea su cercanía al origen. De esta manera, anulando uno de los polos, se dispone de un nuevo polo que puede posicionarse al antojo del diseñador.

Tras diversas pruebas en simulaciones, se ha optado por colocar el polo en la posición -1, de manera que se obtiene una respuesta del sistema, con una dinámica acorde a los requisitos del control. En este caso se opta por tener la menor sobreoscilación posible, junto con un tiempo de establecimiento tal, que evite aceleraciones demasiado bruscas en la velocidad del eje del motor.

Como último parámetro de diseño, se tiene la constante proporcional. Su valor es determinado de forma experimental mediante simulaciones hasta obtener la ganancia deseada para el regulador. De hecho, este regulador es, implícitamente, un regulador PI real ($K \cdot \frac{s+a}{s+b}$), en el que se ha hecho coincidir el parámetro “a” con la posición del polo del driver. El parámetro “b” representa la posición del polo de un regulador PID ideal, o la posición del polo de un PI real, es decir, el polo cuya posición elige el diseñador.

El valor de la constante P viene determinado por la respuesta de la simulación realizada, en la que se pretende obtener una respuesta sobreamortiguada. Conviene recordar que en el caso del modelo teórico, se trata de un sistema de segundo orden. De ahí que puedan darse sobreoscilaciones que no son deseadas en la aplicación de este proyecto.

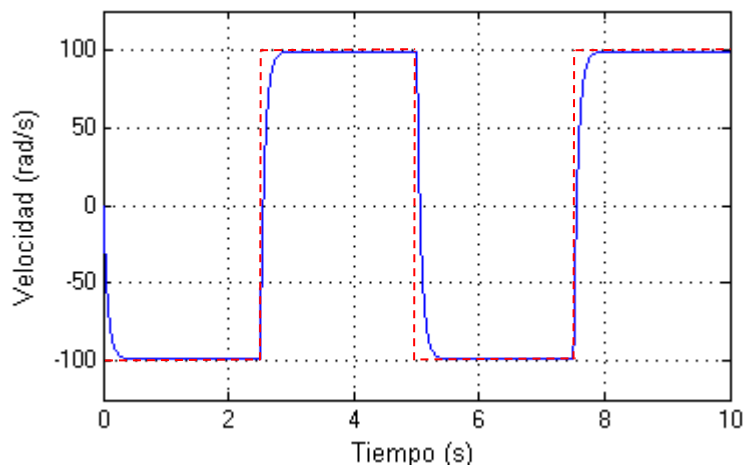


Figura 4.17 Respuesta velocidad método cancelaciones (teórica).

En la Figura 4.17 se encuentra representada la respuesta teórica del sistema cuando se cancela el polo del driver con el cero del regulador. Por otro lado, la señal se estabiliza en el valor deseado, y lo hace con una aceleración controlada a través del polo introducido por el regulador. Con dicho polo en la posición -0,15 se obtiene una dinámica del sistema lo

suficientemente rápida aunque sin dar opciones a posibles desperfectos en los dispositivos físicos. De esta forma, se ha implementado un sistema de control mediante una técnica diferente a las anteriores, la cancelación de pares polo-cero.

Como se hizo en el caso de la técnica clásica de control, ahora también se analizan tanto el esquema con la planta calculada de forma teórica, como con la calculada de forma gráfica.

Se presenta en la Figura 4.18 el esquema, un híbrido de los esquemas de la Figura 4.16 y la Figura 4.11.

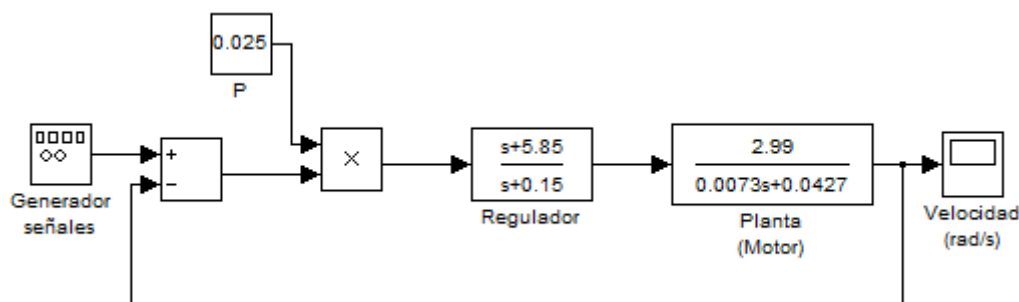


Figura 4.18 Esquema control velocidad por cancelaciones (f.d.t. experimental).

El esquema es similar al anterior, pero en este caso, la planta es de orden 1. Esto se debe a que, como ya se ha explicado en el capítulo de Hardware, la f.d.t. calculada por el método gráfico, se aproximó a una de primer orden, ya que calcular la de orden 2 supone un esfuerzo importante y muy poca mejora frente a la de orden 1. También se recuerda que el valor de 2,99 es la ganancia del driver para 1V, y se obtuvo de la recta de regresión (Figura 3.5) vista durante el estudio del motor.

En este nuevo caso, el regulador cancela el único polo de la planta.

$$G_{teórica\ Motor} = \frac{1}{0,0073s + 0.0427} = \frac{136,99}{s + 5,85} \rightarrow p_{Motor} = -5.85 \quad (4.10)$$

De esta manera, si se cancela el único polo de la planta, el otro polo permite determinar la rapidez del sistema en su dinámica. De nuevo este valor ha sido elegido de forma que satisfaga los requerimientos de la aplicación, es decir, evitar un comportamiento demasiado brusco a la vez que estabilizar de manera satisfactoria la salida del modelo. Dichos comportamientos bruscos pueden resultar lesivos para un motor, y más aún si se trata de un motor pequeño de precisión.

En cuanto a la constante P, también ha sido seleccionada de forma experimental, por el método de ensayo y error, de la misma manera que la simulación correspondiente al esquema de la Figura 4.16.

De nuevo se puede analizar la respuesta del sistema controlado (sistema simulado experimental) por el método de las cancelaciones.

La respuesta es, también en este caso, la esperada, tanto en tiempo de estabilización como en dinámica.

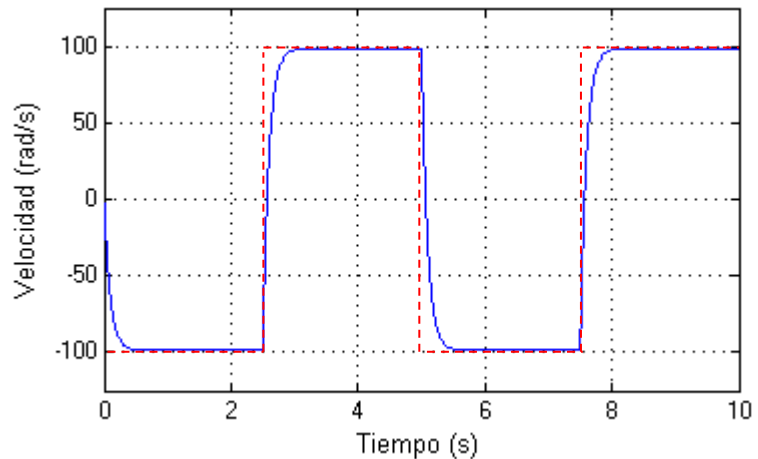


Figura 4.19 Respuesta velocidad método cancelaciones (experimental).

Ensayo

Cuando se llega a una conclusión sobre los posibles diseños ya simulados, sólo queda ensayarlos para verificar los resultados del estudio elaborado.

De la misma manera que se ha explicado en los ensayos con el método de control clásico, el esquema difiere del creado para la simulación. La realimentación está implícita de la misma forma que el ensayo anterior y tiene el aspecto de la Figura 4.20.

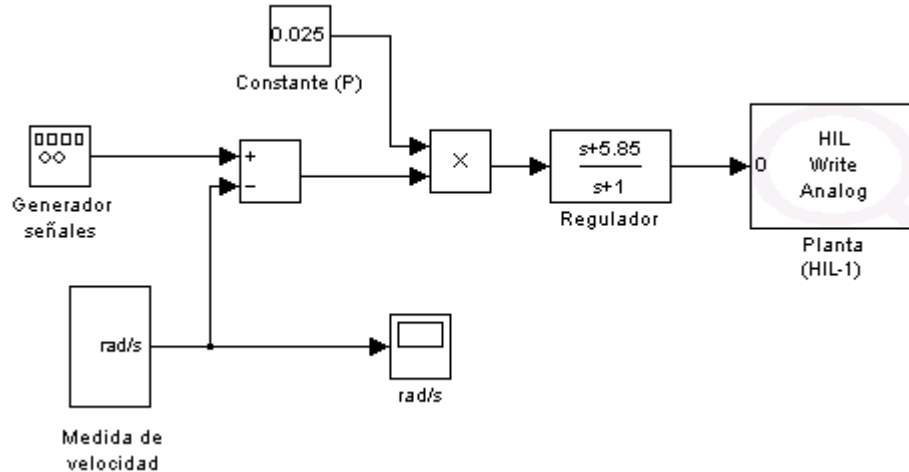


Figura 4.20 Esquema de control real de velocidad por cancelación.

El esquema representa un control por cancelación de pares polo-cero. A continuación se analizará la respuesta del sistema real con los controles diseñados con esta técnica.

La respuesta obtenida del ensayo sobre el sistema real es la representada en la Figura 4.21.

Se trata de una señal similar al ensayo del sistema de control por el método clásico.

Se aprecian las pequeñas sobreoscilaciones detalladas en la Figura 4.15. De igual manera se observa ruido durante el intervalo de la señal estabilizada, por los mismos motivos que el ensayo anterior.

A la vista del estudio realizado para el control de velocidad por medio de dos técnicas diferenciadas, se pueden sacar varias conclusiones.

Por un lado, la técnica clásica es válida para sistemas de cualquier orden. Sin embargo, la técnica de cancelación de pares polo-cero, aun siendo válida para cualquier sistema, se hace mucho más ventajosa

que la clásica en sistema de primer orden. En ellos, existe un único polo que será donde colocaremos nuestro cero, quedando un solo parámetro por determinar, el polo de regulador que fijará la dinámica. Por tanto, cuando el orden del sistema es superior a uno, por regla general será conveniente el uso de las técnicas clásicas, ya que serán más sencillas. Además, la cancelación es muy intuitiva para orden 1, si tenemos en cuenta el lugar de las raíces. De tener un mayor orden, esa intuición queda mermada.

Por otro lado, se concluye que ambas técnicas conducen a los mismos resultados. Sin embargo, la diferencia entre ambos reside en el riesgo de resultar inestable. Como ya se ha mencionado anteriormente, la cancelación polo-cero supone un riesgo en la estabilidad del modelo, por el hecho de que las cancelaciones reales no existen, y esto puede provocar asíntotas en el lugar de las raíces que traspasen hacia el semiplano positivo, causando la inestabilidad.

Tras estas conclusiones, se puede decir que cada método tiene unas ventajas frente al otro, y viceversa, pudiéndose ser más apropiado cada uno de ellos según la situación presentada. En este caso en que se pretende controlar la velocidad del motor, la aproximación a un sistema de primer orden hace más ventajosa la técnica de las cancelaciones. Aun así, si se opta por la aproximación más real a un segundo orden, la técnica clásica aportará un control más eficiente dando la opción de controlar la sobreoscilación que se produce en la realidad (Figura 4.15).

Por tanto, dependiendo de la precisión y fiabilidad requerida en cada proyecto, una técnica o la otra será más adecuada para controlar el sistema.

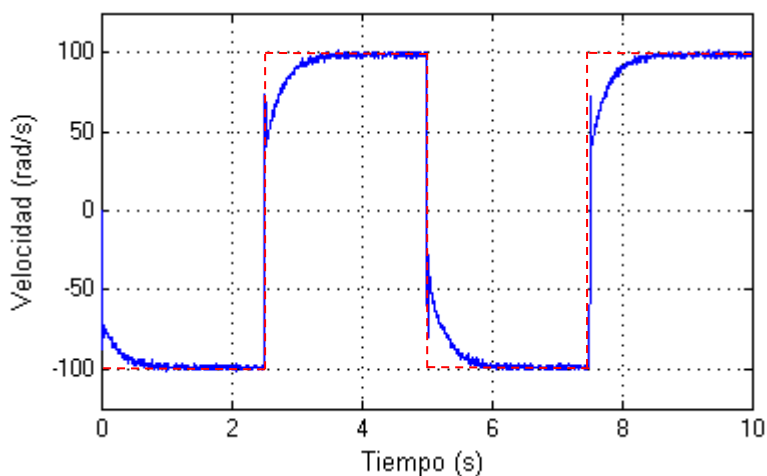


Figura 4.21 Respuesta real en velocidad (cancelación polo-cero).

4.5 Control de posición

Tras controlar la velocidad del eje del motor, es posible controlar la posición de forma inmediata. Partiendo de la relación existente entre posición y velocidad, se puede extraer una forma sencilla de controlar la posición a partir de la velocidad.

$$v = \frac{d\theta}{dt} \rightarrow \theta = \int v dt \quad (4.11)$$

Como se desprende de la Ecuación 4.11, es necesario integrar la velocidad para obtener posición. Es en dominio frecuencial, aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación 4.11 resulta:

$$\theta = v \cdot \frac{1}{s} \quad (4.12)$$

Según este resultado, basta con aplicar a la señal de velocidad un integrador para obtener la posición y proceder a su control.

Teniendo en cuenta las similitudes con el control desarrollado anteriormente, se estudiará dos tipos de posibles controles, tal y como se hizo en el control de velocidad. Estos son cancelación de pares polo-cero y control clásico mediante bloques PID.

4.5.1 Control clásico

El control clásico trata de controlar los sistemas de diferente orden mediante reguladores PID que poseen la siguiente forma:

$$PID = P + \frac{I}{s} + D \cdot s \quad (4.13)$$

En la ecuación 4.13, los parámetros a ajustar son: P (constante proporcional), I (constante integral) y D (constante derivativa).

Simulaciones

De nuevo, manteniendo la misma metodología, se comprobarán los resultados del sistema de control en dos supuestos a priori diferentes (aunque idealmente sean idénticos). Estos son los del sistema de control de posición considerando la f.d.t. del motor teórica (junto con la experimental del driver), y el sistema con la f.d.t. experimental (conjunto motor+driver).

El primero queda reflejado en el esquema de control clásico observado en la Figura 4.22.

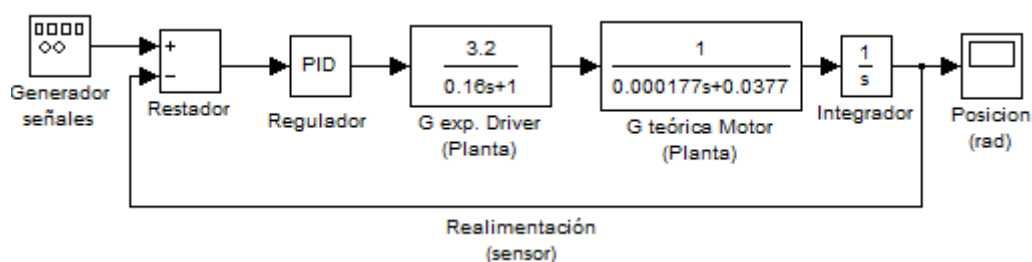


Figura 4.22 Esquema control clásico de posición con f.d.t. teórica.

El esquema de la Figura 4.22 corresponde a un esquema simulado similar al de la Figura 4.9 del apartado de control de velocidad. Se trata de un esquema apto para simular el sistema. Por este motivo, el esquema ha sido modificado respecto del esquema de control real.

Como parte principal, cabe destacar la planta. Como ya ha sido explicado en el apartado de control de velocidad, para la simulación se ha optado por separar la función de transferencia correspondiente al motor de la correspondiente al driver. La primera ha sido calculada analíticamente a partir de los datos proporcionados por la hoja de características, mientras que la segunda ha sido calculada de forma gráfica mediante la respuesta obtenida con una entrada escalón de 1 voltio de amplitud. El resultado se encuentra explicado en el apartado dedicado al *hardware* y de él se desprenden las funciones de transferencia mostradas en el esquema bajo el nombre de Planta. El producto de ambas constituye la función de transferencia total del motor junto con la amplificación del driver. En este caso, esa velocidad obtenida debe ser transformada en posición de la manera explicada en las ecuaciones 4.11 y 4.12, es decir, mediante la inclusión de un integrador (1/s).

El resto de componentes son idénticos al resto de controles ya analizados.

Conviene recordar que la señal generada por el generador de señales es una onda cuadrada de amplitud 100 radianes y una frecuencia de 0,2 Hz. Además, la ganancia del lazo de realimentación es unitaria, pero este hecho viene de la adecuación del esquema para poder ser simulado. En el sistema real esta ganancia no será tal.

Una vez explicada la estructura del esquema implementado, se procede a la parte más importante del apartado, la sintonización del regulador PID. Tal y como se ha hecho en el control de velocidad, y atendiendo a lo explicado en [14] - [16] de sintonización de reguladores PID, se ensaya mediante múltiples simulaciones con diferentes valores para las ganancias proporcional, integral y derivativa. En el documento referenciado se explica el comportamiento de un sistema de control con realimentación ante la variación de cada uno de los parámetros del PID. También muestra como afrontar la sintonización para llegar a un sistema estable y controlado según los requerimientos, de una forma rápida y fiable.

Según estas consideraciones, el sistema queda controlado por el método de prueba y error, con los siguientes valores de las ganancias del regulador:

$$P=0,35$$

$$I=0,25$$

$$D=0,05$$

Con estos parámetros se consigue una señal de respuesta como la que se muestra en la Figura 4.23 (línea azul), con la señal

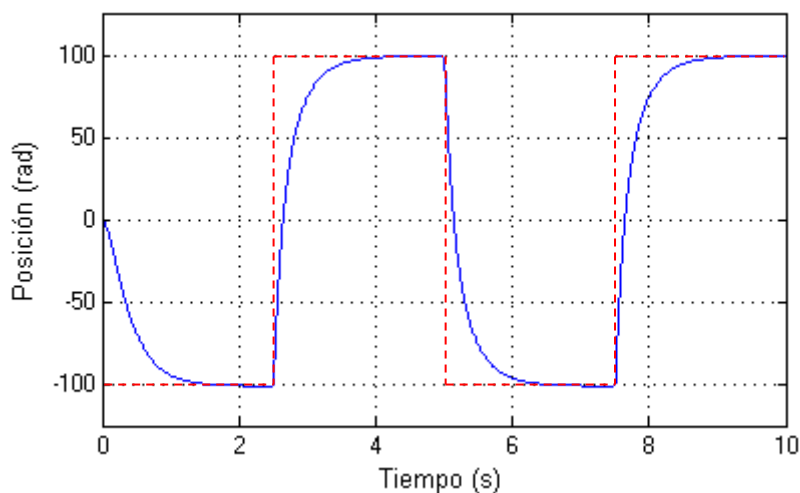


Figura 4.23 Respuesta posición método cancelaciones (teórica).

de entrada del generador de señales (rojo).

Los parámetros escogidos para la sintonización del PID proporcionan la forma de onda buscada, en la que se evita que los cambios producidos en el giro de motor, sean tan rápidos que puedan dañar el mismo.

Como se puede observar en la Figura 4.23, el tiempo de establecimiento es aproximadamente de 1 segundo, alcanzando el valor marcado como referencia. De hecho, el sistema sobreoscila ligeramente, debido a que el orden del sistema simulado es tres.

De esta manera se ha conseguido controlar la posición con unas características dinámicas válidas para este proyecto.

A continuación se va a analizar del mismo modo el mismo sistema con la f.d.t. conjunta de motor + driver. Esto proporciona una mayor seguridad a la hora de implementar dicho control en el sistema real.

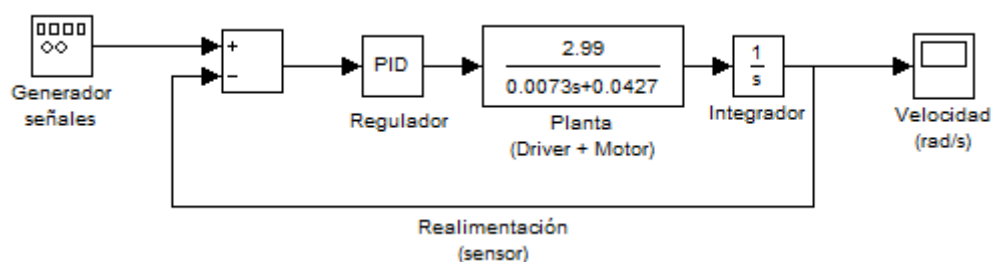


Figura 4.24 Esquema control clásico de posición con f.d.t. experimental.

El esquema es similar al anterior con la excepción del bloque de la planta, que como ya se ha mencionado, se trata de una función de orden uno que modela la respuesta del motor, previamente amplificado por el driver. Para conseguir una f.d.t. sencilla y fácilmente manipulable, se ha aproximado, a la hora de determinarla gráficamente, a una de primer orden, ya que considerarla de segundo orden lleva a unos cálculos sensiblemente más complejos mientras que la información adicional aportada es muy escasa. Esto es así porque en este proyecto, se prefiere ralentizar la estabilización del sistema pero evitar sobreoscilaciones que podrían causar daños al paciente durante su uso. En el capítulo 3, en el apartado dedicado al motor, puede encontrarse más información acerca de la obtención de estas funciones de transferencia.

En cuanto a la sintonización del regulador, las ganancias son las mismas que las del caso anterior con el objetivo de corroborar la validez del sistema de control diseñado durante la primera parte de este mismo apartado. Con ello, la forma de onda obtenida en las mismas circunstancias que la simulación anterior, y suponiendo la planta como una única f.d.t. de primer orden, es la mostrada en la Figura 4.25. Como se observa, la respuesta es la esperada, casi idéntica a la del caso de la planta motor+driver, pero ahora no existe sobreoscilación.

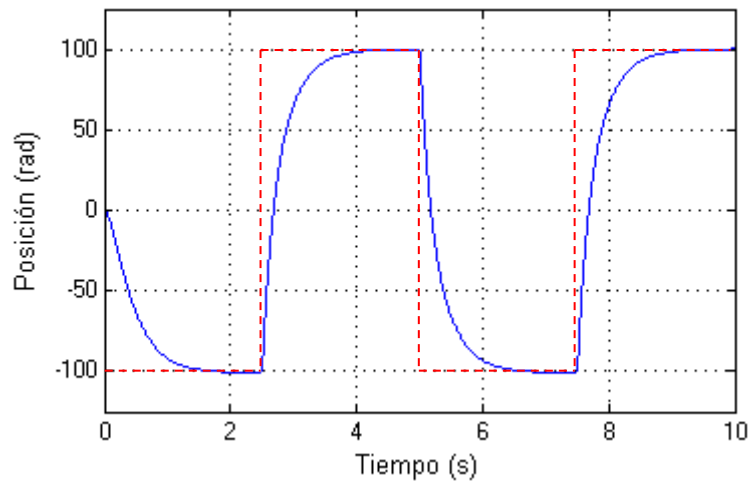


Figura 4.25 Respuesta posición método cancelaciones (experimental).

Una vez analizada la respuesta del sistema de control implementado, y con la garantía de haber realizado dos comprobaciones, se procede a la configuración del sistema real para ensayar dicho lazo de control.

Ensayo

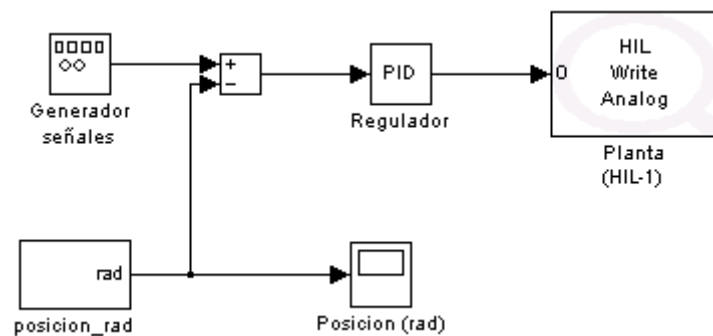


Figura 4.26 Esquema de control real de posición por método clásico.

Una vez más, el montaje del sistema físico se efectúa de manera diferente a los esquemas para las simulaciones. Como ya se ha explicado, el lazo de realimentación no existe físicamente en la realidad, sino que es el sensor, junto con un acondicionamiento de la señal sensada, los que constituyen dicho lazo.

En cuanto al resto de bloques, únicamente mencionar que se ha configurado el regulador de la misma forma que en las simulaciones obteniendo la señal de la Figura 4.27 como respuesta.

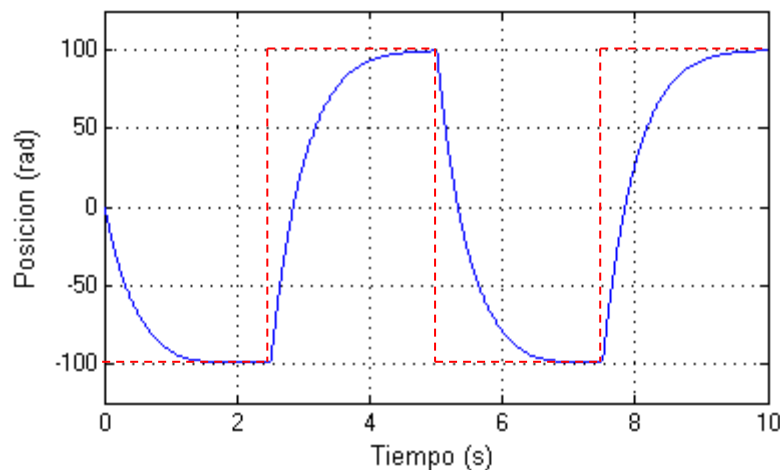


Figura 4.27 Respuesta real en velocidad (método clásico).

En dicha Figura 4.27 se puede observar, comparando con las respuestas de la Figura 4.23 y la Figura 4.25, que en este caso la dinámica es levemente más lenta. El tiempo de estabilización no se ajusta como se simuló previamente y por tanto, el sistema consigue estabilizar su salida en un tiempo algo superior a 1 segundo.

A la vista de estos resultados, se extraen varias conclusiones. De nuevo en el análisis del control de posición, se verifica lo ya contrastado, que la función de transferencia calculada de modo teórico, coincide razonablemente con la función de transferencia calculada de modo gráfico (experimental). Por otro lado se concluye que es simple controlar la sobreoscilación del sistema. Esto permite que en caso de utilizar este proyecto en modo de asistencia al movimiento del dedo del paciente, el dedo describirá una trayectoria “limpia” sin riesgo para las articulaciones. Como conclusión final, se extrae que el sistema diseñado mediante simulaciones es válido para el sistema real aunque es posible reajustar los parámetros del regulador si fuera necesario variar la velocidad del control.

4.5.2 Cancelación pares polo-cero

Ahora se procede al diseño de un nuevo lazo de control para el sistema. En este caso se pretende utilizar un regulador que permita compensar el efecto introducido por el polo dominante, mediante un cero situado en la misma posición. Al anular dicho efecto es posible colocar el polo del regulador en una posición que proporcione la dinámica deseada.

Simulaciones

Siguiendo con el modo de actuación usado hasta el momento, primero se diseñará un sistema virtual, para simular el sistema físico real. Una vez ajustados todos los parámetros, se procederá a su implementación en la realidad.

El estudio comienza con la esquematización del sistema utilizando la f.d.t. teórica del motor en conjunto con la experimental del driver. Dicha esquematización queda plasmada en la Figura 4.28.

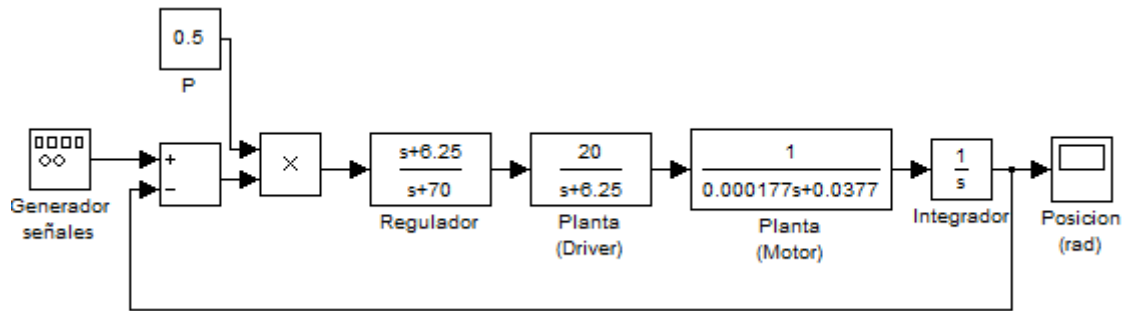


Figura 4.28 Esquema control de posición por cancelación polo-cero con f.d.t. teórica.

El esquema observado muestra la estructura vista en la Figura 4.1 de un sistema de control genérico. Identificando los elementos, se tiene la realimentación con ganancia unitaria, el comparador (restador), generador de señales cuadradas (0,2 Hz), la planta (motor + driver), y por último, el regulador (constante P junto con el bloque denominado Regulador).

Siguiendo el mismo procedimiento que hasta ahora, el cero del regulador se sitúa de forma que anule el efecto del polo de la planta. En cuanto al polo del regulador, será colocado en aquella posición que proporcione la dinámica deseada, es decir, aquella que no comprometa la seguridad del paciente durante el uso del prototipo. Para ello, evitaremos aceleraciones pronunciadas y sobreoscilaciones sobre el valor establecido como referencia.

Colocando el polo en la posición $s=-70$, obtenemos la respuesta de la Figura 4.29 que resulta satisfactoria para el uso que le será dado.

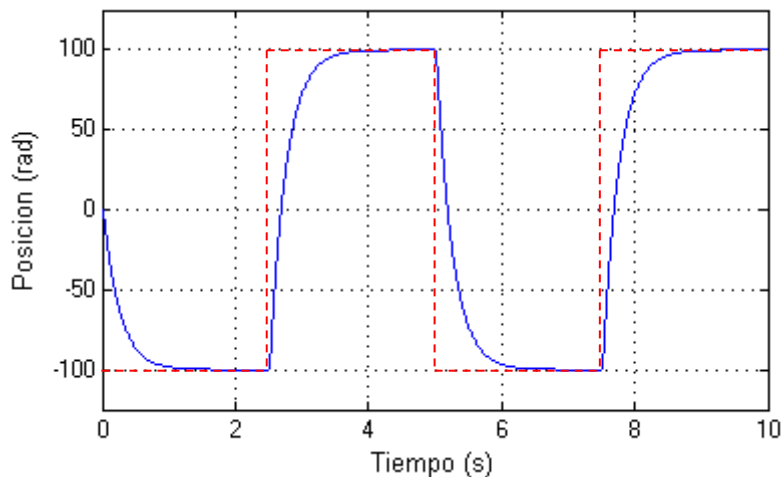


Figura 4.29 Respuesta posición método clásico (teórica).

A la vista de la gráfica se desprende una información similar a la obtenida en el caso del control clásico. La dinámica conseguida es suficiente, aun considerando el sistema como de tercer orden, ya que no hay que olvidar que el integrador es un polo adicional del sistema.

Cabe destacar que el efecto de un integrador no debe ser anulado como polo dominante, por lo que el polo a anular será el más próximo al origen exceptuando los polos en el origen.

Teniendo en cuenta la explicación de apartados anteriores donde se explica que este regulador es en realidad un PID o un PI real, se matiza que el valor de la constante proporcional debe estar entre 0 y 1 para que la respuesta no sea brusca. Los valores fuera de este rango son factibles, aunque si es muy elevado puede provocar la inestabilidad del sistema.

A continuación se realiza el mismo estudio con la única diferencia de la función de transferencia de la planta. En este caso es de segundo orden, ya que el segundo polo lo introduce el integrador. El aspecto del esquema de simulación es idéntico al anterior cambiando la planta, y como consecuencia, cambiando la posición del cero que anula el polo dominante del sistema.

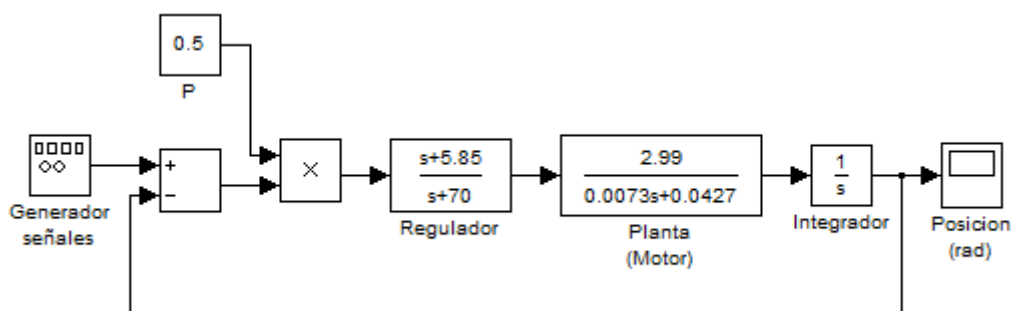


Figura 4.30 Esquema control posición por cancelación polo-cero (f.d.t. experimental).

Imponiendo los mismos valores para la constante P y la posición del polo del regulador, se procede a la simulación para obtener la respuesta en las mismas condiciones que la simulación anterior. Se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 4.31.

De nuevo se aprecian mínimas sobreoscilaciones sobre el valor de referencia, mostrado con trazo discontinuo de color rojo. El tiempo de respuesta es casi nulo, y el tiempo de establecimiento es aproximadamente 1 segundo, ya que se ha predeterminado así. Variando la posición del polo del regulador sería posible hacer el sistema más rápido, más lento o aumentar o reducir las sobreoscilaciones.

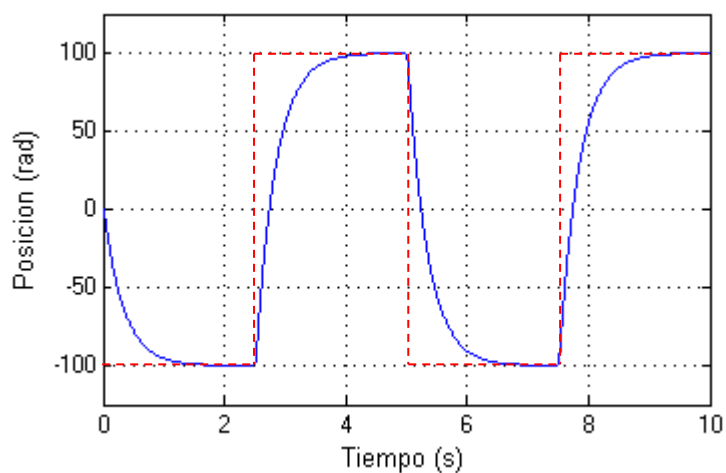


Figura 4.31 Respuesta posición método clásico (experimental).

La respuesta observada en la Figura 4.31 es muy similar a la obtenida en la Figura 4.29, por lo que se asume que el diseño del lazo de control es viable y además se considera adecuado para el sistema real.

Ensayo

Por último, sólo resta ensayar el control diseñado y verificar que se controla el sistema de manera correcta, conforme con las especificaciones.

El esquema es el genérico ya descrito para el sistema real, con las peculiaridades del lazo de realimentación y del bloque posición_rad. Es importante tener en cuenta que ahora no se debe introducir el integrador, sino que ya se ha incorporado en el bloque de medida de posición. De esta manera, se obtiene un sistema en el que se muestrea una señal con unidades de posición (sensor) y se comparan de la misma forma, unidades de posición, obteniendo un error de posición y no de velocidad como ocurría en el control de velocidad.

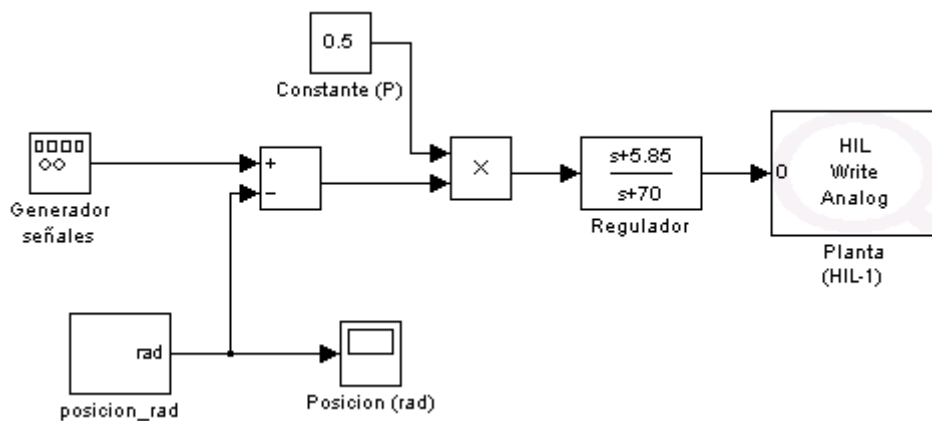


Figura 4.32 Esquema de control real de posición por cancelación.

En la Figura 4.32 se observa el esquema completo de control con los parámetros obtenidos del estudio previo. Con todo ello, la respuesta obtenida es la que aparece en la Figura 4.33.

En la respuesta real obtenemos una forma de onda similar a la esperada a partir de las simulaciones. Sin embargo, el tiempo de establecimiento es mayor, es decir, el sistema es ligeramente más lento. Esto provoca que las sobreoscilaciones mínimas que se apreciaban en la Figura 4.29 y la Figura 4.31, sean atajadas con mayor eficacia eliminándolas por completo.

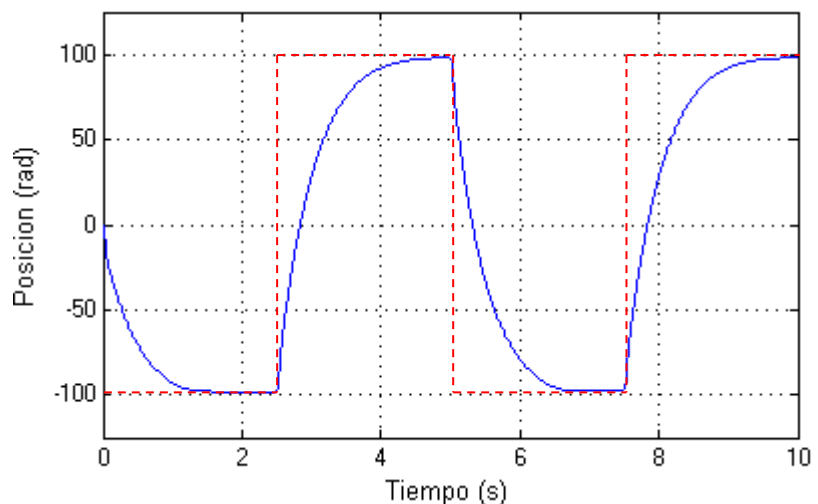


Figura 4.33 Respuesta real en posición (cancelación polo-cero).

La conclusión es clara: el lazo de control diseñado satisface las especificaciones del proyecto, confirmando además, el buen hacer a la hora del cálculo de las funciones de transferencia del motor y del driver operando como amplificador.

4.6 Medida de fuerza

La medida de fuerza es el objetivo principal de este proyecto en lo que a sistemas de control se refiere. El propósito final es diseñar y construir un sistema que facilite la rehabilitación de los dedos de la mano, y para ello se hace necesario controlar la fuerza ejercida por el paciente para poder actuar convenientemente sobre la mano. Como ya se introdujo al principio de este documento, el objetivo se hace aún más ambicioso cuando se pretende controlar una magnitud como la fuerza evitando el uso de sensores para dicho propósito. Esto acarreará una disminución notable en el coste.

La forma en que se va a medir esta magnitud es mediante la corriente consumida por el motor. Estas dos magnitudes, fuerza e intensidad, están relacionadas mediante una constante medida experimentalmente por el fabricante, y detallada en la hoja de características.

Con el objeto de lograr una mayor simplicidad en el método, la medición de corriente se realizará a través de la caída de potencial en una resistencia pequeña intercalada a propósito, y por lo tanto de valor conocido. Así se evita la necesidad de un sensor de corriente, los cuales tienen un coste que encarecería el producto demasiado como para no ser accesible a la mayoría de la población. Para medir dicha diferencia de potencial será aprovechando las entradas analógicas de las que dispone la placa de desarrollo de QuaRC, y se monitorizarán en el entorno de Simulink. Además, las entradas analógicas de la placa son diferenciales, lo que facilita la tarea. Dos cables conectados a los puntos donde se desea medir la caída de tensión serán suficientes para obtener la diferencia de potencial.

Para llevar a cabo estos pasos que parecen sencillos, primero es necesario el estudio del funcionamiento básico de los motores de corriente continua. En el Anexo A3 se explica más en profundidad este tema. El esquema eléctrico de un motor de este tipo (corriente continua sin escobillas) es el que aparece en la Figura 4.34.

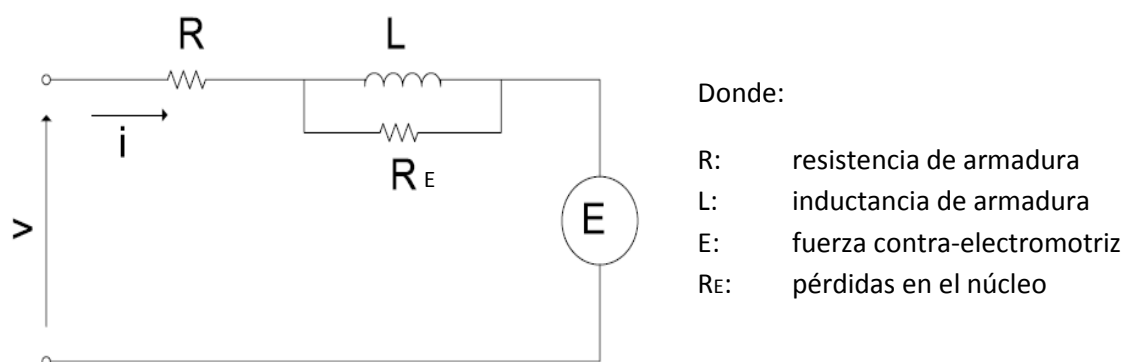


Figura 4.34 Modelo eléctrico, motor DC de imanes permanentes.

Para lograr medir la corriente que consume el motor durante su funcionamiento, se debe de medir la corriente definida como "i" en la Figura 4.34. Se conseguirá acoplando una nueva resistencia en serie con un valor bajo que no modifique sustancialmente el sistema.

Una vez que se ha dispuesto la resistencia convenientemente, se debe conectar cada uno de sus bornes con los de la entrada analógica que se vaya a utilizar. El conector de dicha entrada es de tipo RCA hembra, por lo que se colocará el punto de mayor tensión al interior del conector, y el de menor tensión al anillo exterior del RCA.

El procedimiento consiste en monitorizar la señal diferencial introducida por la entrada analógica. Para ello sólo hay que crear un esquema simple en Simulink, con un monitor y un bloque de lectura de la entrada. Esta entrada será la diferencia de potencial, puesto que la resistencia de sensado introducida es de 1Ω , esta respuesta coincidirá con la corriente consumida. En la práctica, ese valor tendrá una tolerancia que puede incrementar el error entre el estudio teórico y los ensayos reales. Además, para realizar la prueba, introducimos al sistema una señal escalón de $0,25V$ (voltaje bajo para evitar daños si existiera algún error) sin retardo obteniendo la respuesta reflejada en la Figura 4.35.

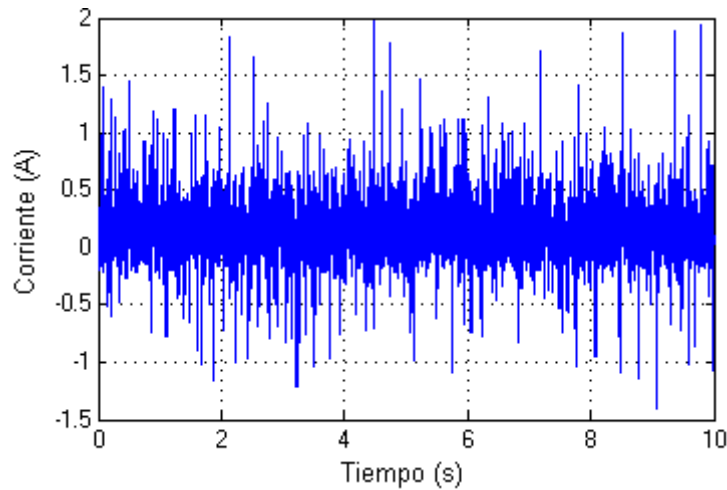


Figura 4.35 Medida de corriente consumida por el motor (directa).

Este ensayo ha sido realizado impidiendo manualmente el movimiento, de manera que el motor obtiene resistencia externa al movimiento de su eje e incrementa la corriente para lograr vencerla. En este ensayo, al tratarse de una señal de entrada muy baja, la corriente alcanza su límite sin que pueda vencer la resistencia del freno.

En la Figura 4.35 se observa como la medida de corriente es una señal con mucho ruido en la que apenas se distinguen tendencias o valores medios. Ante este hecho, se decide incluir un filtro paso bajo (LPF) que permite el paso de las bajas frecuencia, eliminando las altas, pudiendo así obtener el valor medio de la corriente.

$$f.d.t_{LPF} = \frac{1}{1 + T_s} \quad (4.14)$$

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi \cdot T} \rightarrow T_{0,25Hz} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,25} = 0,637s \quad (4.15)$$

$$f.d.t_{0,25Hz} = \frac{1}{1 + 0,637s} \quad (4.16)$$

Tras varias pruebas con el mismo tipo de filtro y diferentes frecuencias de corte, se opta por 0,25Hz que proporciona una señal clara y legible (Figura 4.36). En ella se distingue claramente la tendencia de la corriente consumida por el motor. Aun así, quedan reflejados picos en la banda de estabilización de la señal. Estos picos son provocados por la propia frecuencia de corte elegida. Además, se observa como el ruido de más baja frecuencia persiste tras resistir su paso por el filtro. Cabe destacar que los valores coinciden razonablemente bien con los medidos mediante un voltímetro.

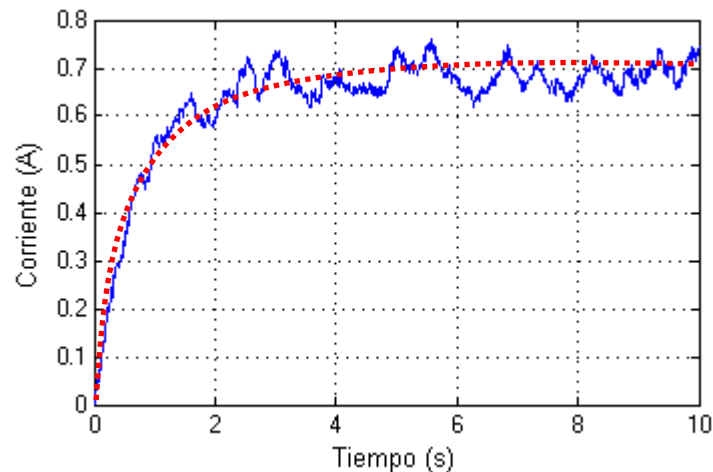


Figura 4.36 Medida de corriente consumida por el motor (con LPF).

En la Figura 4.36 se muestra la respuesta del sistema (azul) y la aproximación de orden 1 (rojo).

A pesar del ruido de la señal, es suficiente para determinar la f.d.t. V-I del conjunto motor + driver, actuando de la misma manera que se hizo para calcular la f.d.t. V-v. Por lo tanto:

$$G_{\text{exp } V-I} = \frac{K}{\tau_m s + 1} = \frac{0,7}{0,8s + 1} = \frac{1}{1,1429s + 1,429} \quad (4.17)$$

Para verificar el ajuste de la gráfica a una función de orden uno realizada, se simula la f.d.t. calculada para comparar las respuestas.

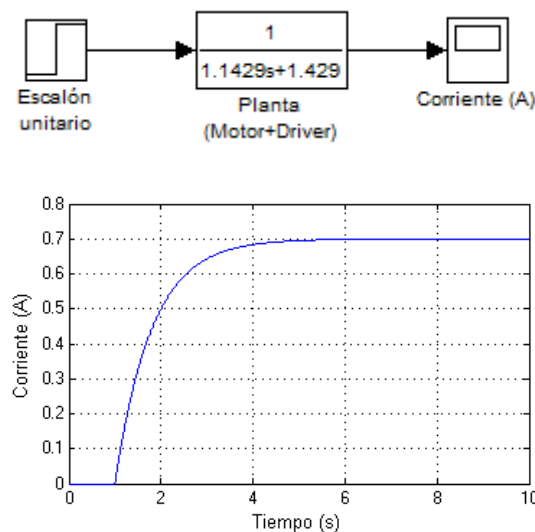


Figura 4.37 Simulación f.d.t. calculada experimentalmente (motor+driver+filtro).

Como se observa en la Figura 4.37, la respuesta simulada se asemeja de convenientemente a la real obtenida. Se trata de la respuesta del conjunto compuesto por el motor, el driver y el filtro implementado.

Gracias a esta función de transferencia aproximada, será posible trabajar con una simulación y no sobre el sistema físico para evitar daños en el mismo.

Una vez conseguido el reto de la medición del consumo del motor y su variación con la resistencia externa aplicada, únicamente hay que reescalar esta magnitud para convertirla en par ejercido, y fuerza, que es el objetivo final.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, las magnitudes de las que hablamos son proporcionales entre sí según las relaciones siguientes:

$$T = K_t \cdot i \quad (4.18)$$

$$T = F \cdot d \quad (4.19)$$

T: Par (Nm)

i: Corriente

K_t: Constante de Par

F: Fuerza (N)

d: Distancia

Mediante la información aportada por el fabricante del motor en las hojas de características (Anexo A4), se extraen los valores necesarios de las constantes. Dichos valores son K_t=0,0377 Nm/A y d=0,25 mm. Este último es la distancia en perpendicular a la recta de acción de la fuerza, por lo que coincide con el radio del eje del motor. Con estos valores, a partir de la medida continua de consumo del motor, se obtiene a su vez magnitudes tan interesantes como par y fuerza. Esta última es la buscada desde el principio para proceder a su control.

Ha de matizarse que estas magnitudes no son reales, sino que contienen el efecto de una fricción inicial opuesta al movimiento del eje. Esta fricción hace que se utilice parte de la corriente consumida (i₀) para vencerla e iniciar el movimiento. Por ello, se tiene que eliminar este efecto mediante una simple resta para obtener valores reales. Mediante tanteo, se ha constatado que el motor necesita una señal de entrada de aproximadamente 0,33 voltios para vencer la fricción inicial. Además, gracias al esquema de la Figura 4.38, es posible cuantificar la fuerza requerida para ese mismo fin de empezar el movimiento del eje. Este valor es un valor fácilmente calculable mediante un cálculo teórico simple. “M_r” es el par de fricción y “d” es la distancia a la línea de acción de la fuerza.

$$Fricción_{teórica} \cdot \frac{M_R}{d} = \frac{4,9mNm}{0,0025m} \rightarrow 1,96N \quad (4.20)$$

$$Fricción_{real} \cdot \frac{M_R}{d} = \frac{1,4mNm}{0,0025m} \rightarrow 0,56N \quad (4.21)$$

Una vez más se debe buscar la causa de esta diferencia en los valores de la hoja de características, que como ya se ha explicado son valores medios de un número determinado de motores de la misma serie, lo que puede llevar a errores de este tipo.

Con todo lo descrito se procede al diseño del esquema que permitirá la medición de estas tres magnitudes simultáneamente (Figura 4.38). En él se observa un bloque del que no se ha comentado su utilidad. Es el bloque que calcula el valor medio de la señal. Actúa como un filtro más fino mediante el cálculo del valor medio calculado con los valores tomados de la señal en un intervalo de tiempo fijado por el usuario. En este caso se fija a 5s (0,2Hz).

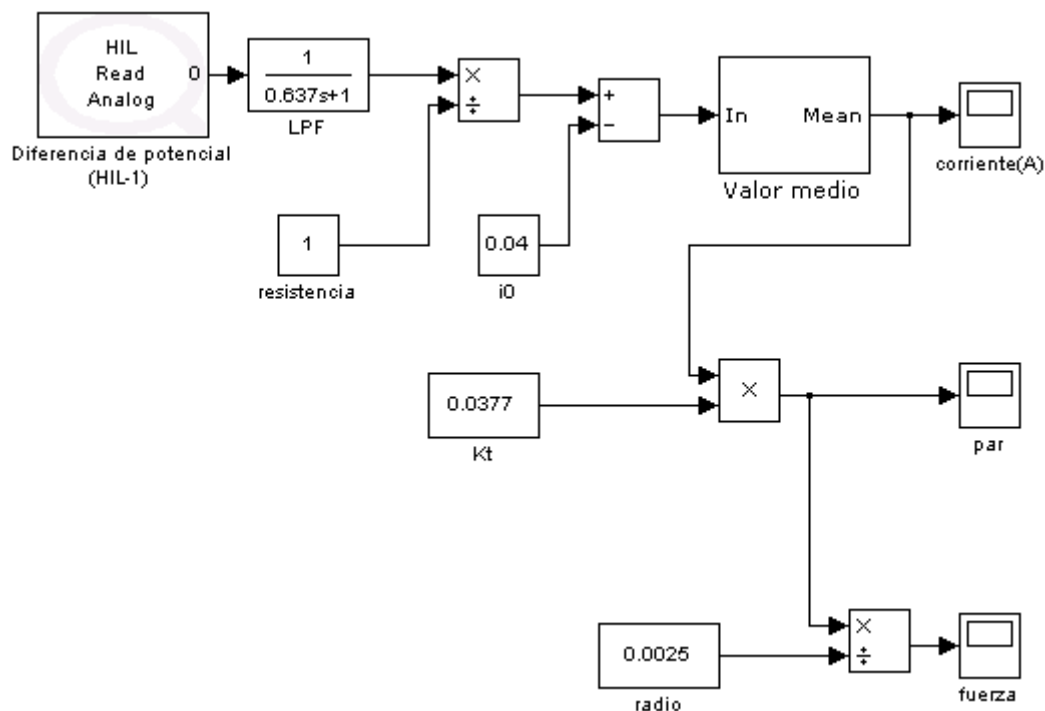


Figura 4.38 Esquema de medida de corriente, par y fuerza.

Como puede apreciarse, este esquema cobra sentido cuando se realiza el ensayo únicamente con eje del motor ($\Phi=5\text{mm}$), sin ningún artefacto adherido a él. En el caso de realizar los ensayos con el prototipo construido, este factor variará dada la polea acoplada al eje. En ese caso, el par aumentará. Por el contrario, la fuerza será menor. Este esquema corresponde a la respuesta monitorizada en la Figura 4.36.

Existen otros factores a tener en cuenta que se extraen de la información aportada por las hojas de características del motor. Así se calcula la mayor fuerza que puede ejercer el motor.

$$\text{Stall Torque} = 539\text{mNm} \quad (4.22)$$

$$F = \frac{T}{d} = \frac{0,539\text{Nm}}{0,0025\text{m}} = 215,6\text{N} \approx 21\text{Kg} \quad (4.23)$$

Este valor aproximado de 21 Kg. es el peso que puede levantar el motor con un hilo acoplado directamente sobre el eje del motor.

Esta forma de calcular corriente, par y fuerza ejercida por el motor, es la base del control de fuerza que se estudiará a continuación en el próximo apartado.

Esta medición tiene una precisión baja, ya que son varios los elementos que introducen errores, aunque es la base para una posible mejora futura.

Una de las posibles mejoras es cambiar el tipo de filtro. Descartados quedan los filtros pasa banda y pasa alta frecuencia. Se propone el estudio y ensayo del sistema de medición de fuerza utilizando un filtro de Kalman.

El filtro de Kalman es un algoritmo desarrollado por Rudolf E. Kalman en 1960 que sirve para poder identificar el estado próximo (no medible) de un sistema dinámico lineal. Además es válido cuando el sistema está sometido a ruido blanco aditivo. Como avance, este filtro es capaz de escoger la ganancia K de realimentación del error de forma óptima cuando se conocen las varianzas de los ruidos que afectan al sistema.

En realidad, este tipo de filtro no aporta mejoras a este proyecto, ya que conocer el estado siguiente no revela información válida para un control de fuerza. Lo que se busca es eliminar ruido de la señal, por lo que calcular el valor medio, el valor RMS o parámetros de ese tipo aportará más información que el filtro de Kalman. En la Figura 4.39 se muestra la respuesta de medida de fuerza cuando el movimiento del eje del motor está completamente impedido.

Como se muestra en dicha Figura 4.39, el filtro elimina mejor el ruido que el LPF (*Low Pass Filter*) elegido. Sin embargo, el sensiblemente más lento ya que a la vista de la gráfica, en un intervalo de tiempo de 10 segundos, aún no ha conseguido alcanzar el régimen permanente, que se encuentra entorno a los 0,7 A. por ello, se ha continuado con el diseño basado en un filtro paso bajo convencional, en el que la frecuencia de corte es el parámetro que determina el aspecto de la señal sensada.

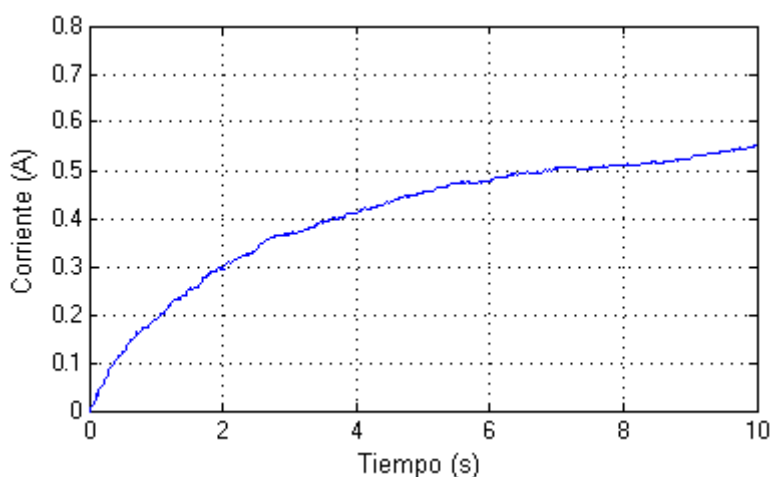


Figura 4.39 Medida de corriente consumida por el motor (Kalman).

Queda demostrado que la opción de utilizar filtros de Kalman no proporciona la mejora esperada y su implementación es menos intuitiva y más compleja que la del LPF implementado.

4.7 Control de fuerza

De la misma manera en que se explicó en el apartado anterior, controlar la fuerza ejercida por el motor, es una consecuencia directa de controlar el par desarrollado por el eje del motor en su superficie, y éste a su vez, consecuencia de controlar la corriente consumida por el propio motor durante su funcionamiento.

La base de este control es sencilla y únicamente tiene sentido cuando el motor se ve sometido a algún esfuerzo externo. El motor es excitado mediante una diferencia de potencial en sus bornes, que genera una corriente en su interior. Esta corriente es suficiente para poder mover el eje a la velocidad requerida. Cuando esta velocidad no se alcanza por existir una oposición externa al movimiento, el motor demanda mayor corriente para poder vencerla y alcanzar la velocidad deseada, por lo que la reacción inmediata es un aumento del consumo del motor.

Según esto, es posible controlar la fuerza ejercida por el motor a partir de su consumo. Esto es lo que se ha estudiado en el apartado 4.6 de medida de fuerza. Dicho estudio es la base del control de la magnitud de fuerza, que será explicado a continuación.

El estudio se estructura en varios apartados, a modo de comparativa, entre diferentes métodos de control para adecuarlo a la aplicación de rehabilitar los dedos de la mano. Los métodos mencionados son la técnica clásica de control, cancelación de pares polo-cero, lógica difusa (*fuzzy logic*) e integración del control de posición y de fuerza de modo simultáneo.

4.7.1 Control clásico

La técnica clásica de control consiste, como ya se ha visto en los sistemas de control de velocidad y posición, en controlar el sistema con la ayuda de reguladores PID. Por tanto, la mayor dificultad reside en la correcta sintonización del regulador para controlar la señal con una dinámica que resulte interesante para el objetivo de este proyecto.

Simulación experimental

El esquema de la Figura 4.40 corresponde al esquema construido para la simulación del sistema incorporando el control de fuerza mediante un regulador PID. En él se han incluido las partes básicas de un lazo de control, y además, un bloque denominado “Convertor I-F” que traduce la corriente absorbida por el motor en unidades de fuerza ejercida por el mismo sobre una carga externa.

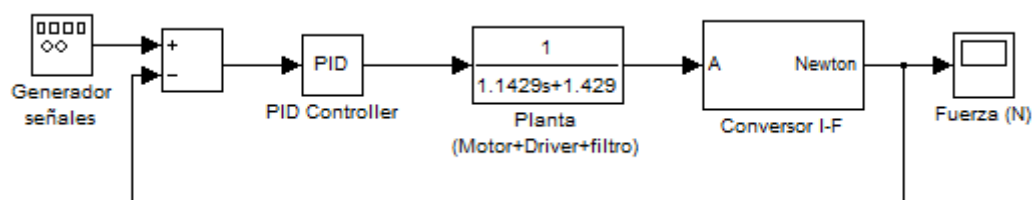


Figura 4.40 Esquema control de fuerza con f.d.t. experimental (control clásico).

En la Figura 4.41 se observa la estructura interna de este convertor. El porqué de la existencia de este bloque es la posibilidad de realizar una comparación más precisa y transparente frente al esquema real del sistema. Por este motivo, se ha desglosado el esquema de “medida de

Sistemas de Control

fuerza” en dos bloques, el ya comentado conversor, y otro que corresponde a la función de transferencia del conjunto, motor + driver + filtro LPF. De esta manera se consigue que el bloque de fuerza de la Figura 4.43 incluya el sensado de corriente, así como el acondicionamiento para obtener la magnitud fuerza (N).

La señal proveniente de la planta es una señal diferencial de potencial medido en los bornes de la resistencia de sensado (1Ω). Al ser dividida la diferencia de potencial por la resistencia se obtiene la corriente que circula por ella. A continuación, a este resultado se le resta la corriente de vacío, que se emplea en vencer la oposición correspondiente a la fricción estática (demostración en el Anexo A3).

Posteriormente sólo es cuestión de aplicar constantes obtenidas de la hoja de características del motor para transformar la corriente consumida en par ($K_t=0.0377\text{Nm/A}$) y éste a su vez, en fuerza ($d=0.0025\text{m}$). Esta última es la medida del radio del eje del motor, y representa la distancia hasta la recta de acción de la fuerza ejercida por el motor, que como es obvio, es tangencial a la circunferencia exterior del propio eje.

$$T = K_t \cdot I \quad (4.24)$$

$$T = F \cdot d \quad (4.25)$$

Según la ecuaciones 4.24 e 4.25, la constante de par (K_t) debe ser multiplicada mientras que la distancia (d) debe ser dividida.

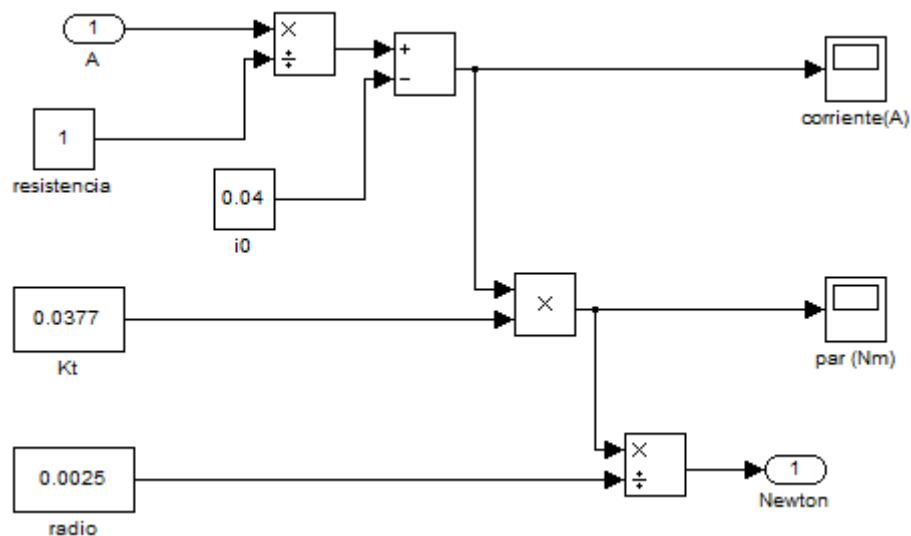
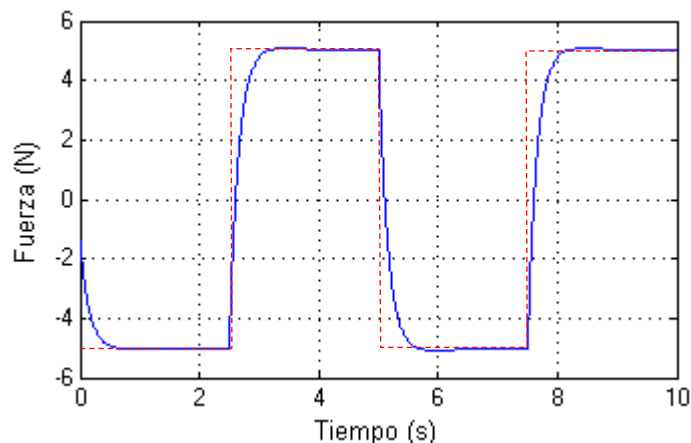


Figura 4.41 Bloque conversor I-F.

Una vez diseñado el esquema que servirá de banco de pruebas para la correcta sintonización del regulador, se procede a las pruebas iterativas para analizar la eficacia del control.

Tras varias pruebas y partiendo de los conocimientos expuestos en [14] y [16] se decide prescindir de la aportación del parámetro derivativo, lo que da como resultado un regulador PI bajo la apariencia de un PID clásico. Se prescinde de él porque este parámetro amplifica los cambios de positivo a negativo de la señal de error, lo que en este caso, con el ruido presente,



aumenta la posibilidad de tornarse inestable. Buscando una respuesta transitoria no demasiado rápida, se opta por una constante proporcional media (0,5), que permita una buena corrección del error pero relegando a la velocidad de respuesta a un segundo plano. Por otro lado, la constante integral se fija a 0,7 evitando las sobreoscilaciones que ya han sido comentadas en este documento y se antojan indeseables. Estos datos proporcionados pueden ser analizados a la vista de la respuesta del sistema configurado de esta manera (Figura 4.42)

Figura 4.42 Respuesta simulada de fuerza (control clásico).

Como se aprecia, la dinámica es suficientemente lenta para evitar daños en los pacientes que usen el prototipo. Sin embargo, las sobreoscilaciones que se pretenden evitar sí que continúan presentes en la simulación, si bien no son significativas.

Ensayo

El sistema diseñado es estable y es, a priori, adecuado para la aplicación que deberá satisfacer. Por lo tanto, sólo resta ensayar el lazo de control en el sistema real y comprobar su validez.

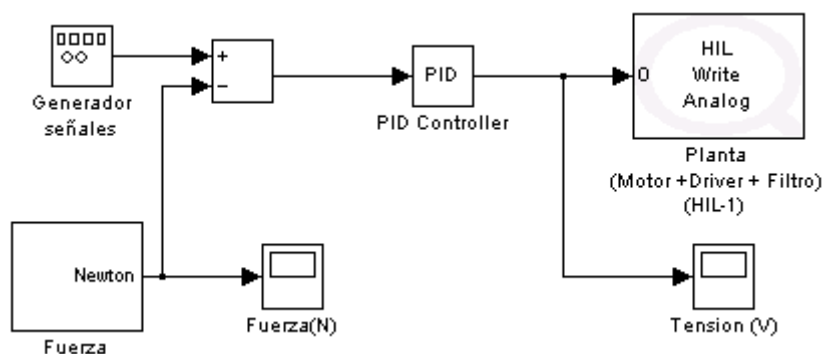


Figura 4.43 Esquema real control de fuerza (control clásico).

En este caso, como en la el resto de esquemas para los ensayos, la estructura cambia de formato aunque mantiene todos sus componentes.

El bloque denominado como “Fuerza” incluye el filtro paso bajo, que permite extraer una señal de potencial aceptable sin ruido, y además incluye la conversión de dicha señal hasta obtener la magnitud deseada, es decir, fuerza.

En este ensayo se han incluido más monitores que permitirán la visualización de magnitudes intermedias como son la corriente absorbida por el motor, la tensión introducida al propio motor para corregir el error en la medida, y el par ejercido sobre una carga que cuelga de la superficie del eje del motor.

En la Figura 4.44 se monitoriza la señal de tensión aportada al motor como consecuencia del trabajo del regulador. Al ser la señal de referencia una onda cuadrada de amplitud 5N y frecuencia 0,2Hz, supone que el período es de 5s. por lo tanto, la señal cambia de valer 5N a -5N cada 2,5s. En las abscisas múltiplos de 2,5s será el momento en el que el error se hace máximo (10N), por lo que el regulador actúa

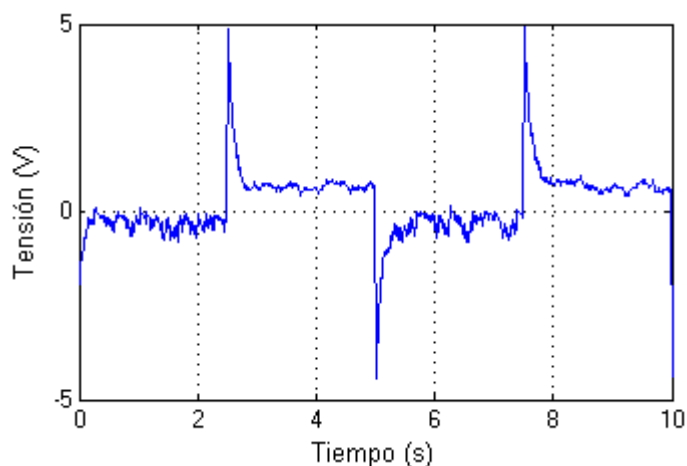


Figura 4.44 Tensión de entrada al motor (método clásico).

aportando la mayor tensión posible para contrarrestar rápidamente el error detectado. Por esta razón aparecen picos en la gráfica. Como consecuencia, el error se hace menor decayendo de igual manera la tensión, hasta estabilizarse a un valor proporcional a la fuerza demandada como valor de referencia.

Como se ha descrito en el apartado de medida de fuerza, tanto intensidad como par como fuerza son magnitudes proporcionales entre sí, por lo que sus respuestas serán similares con diferentes escalas para cada caso. En cualquiera de ellas puede apreciarse la dinámica establecida por el regulador, y también se observa que el sistema real responde de forma muy

aproximada a lo esperado tras las simulaciones ejecutadas.

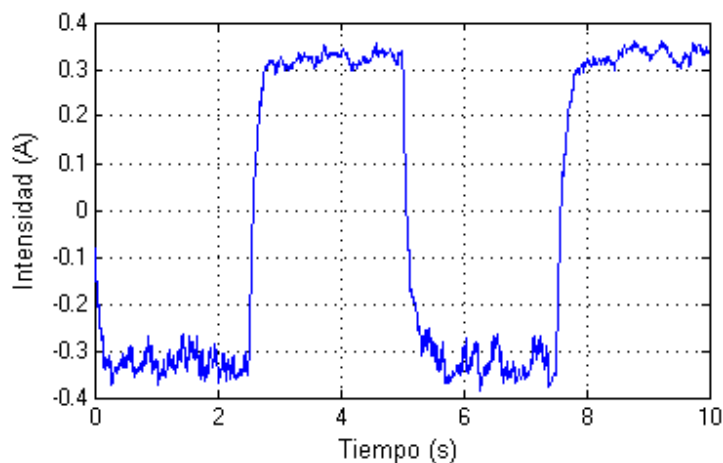


Figura 4.45 Control de corriente (método clásico).

La principal diferencia está en la zona de régimen permanente, en la que debería estabilizarse sin problemas, pero como se ve en la Figura 4.45, al realizar el ensayo real el regulador no consigue ajustar el valor de forma precisa. Esto se debe a dos factores principalmente. Por un

lado, el filtro introduce un retardo en el muestreo de la señal, ya que al eliminar las frecuencias mayores que la de corte, se introduce un error.

El otro factor relevante es la inercia de la corriente respecto de la fuerza ejercida. Se trata de magnitudes que aunque son proporcionales, no responden con la misma velocidad ante los cambios. De ahí que la estabilización sea más complicada y presente variaciones en torno a 0,05A.

Esta circunstancia se ve reflejada en la respuesta del par (Figura 4.46) y en la de fuerza (Figura 4.47), ambas por los mismos motivos explicados, ya que unas magnitudes son extraídas de otras.

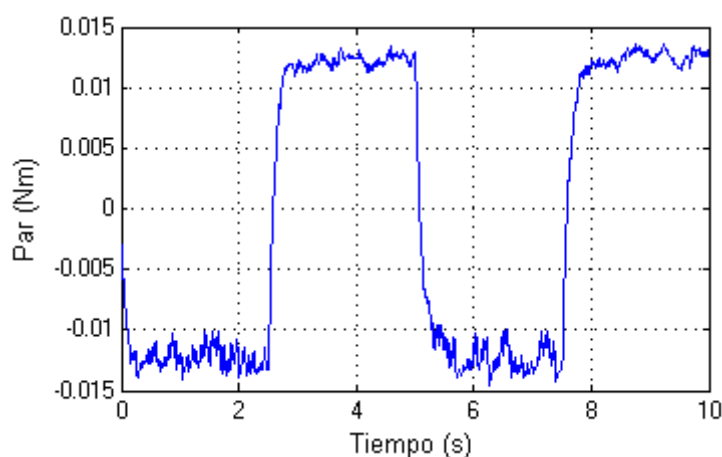


Figura 4.46 Control de par (método clásico).

En el caso de la respuesta de la fuerza, tras ensayar el lazo de control, se ha superpuesto la señal de referencia (rojo) para que la comparación sea más explícita. De ahí se extrae que el control implementado para el sistema físico real es válido. Las leves oscilaciones que provoca el regulador en la zona de régimen permanente son inapreciables en práctica aunque conviene tenerlas en cuenta para que no deriven en una inestabilidad.

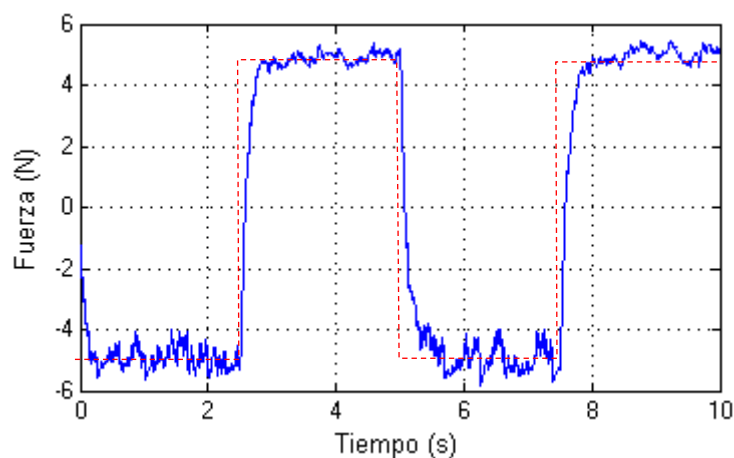


Figura 4.47 Control de fuerza (método clásico).

Como posibilidad diferente a lo estudiado, es posible controlar la dinámica del sistema limitando la tensión saliente de los bloques PID, ralentizando la respuesta del motor.

Como conclusión se puede decir que el control de una magnitud como la fuerza ejercida por un motor de corriente continua, no es trivial. Se trata de una magnitud que para obtener una mayor precisión, debe apoyarse en un sensor de fuerza. Precisamente el reto ha sido controlar esta magnitud sin esa ayuda casi imprescindible, llegando a controlar el sistema con un grado de precisión aceptable. Como consecuencia, se mantiene un coste sensiblemente más bajo que los equipos que incorporan sensores específicos, lo que hace que este proyecto resulte interesante de cara a un futuro cercano.

4.7.2 Cancelación pares polo-cero

Se trata del segundo método de control utilizado para estabilizar la señal de fuerza. Ya ha sido utilizado en controles anteriores por lo que de nuevo, se buscará cancelar el polo dominante del sistema sin realimentación colocando un cero del regulador en la misma posición. El polo del regulador será colocado en una posición que satisfaga la dinámica deseada para el sistema.

También en esta ocasión se estudiará primero de forma simulada y a posteriori se probará en el modelo real.

Simulación experimental

Se trata de un esquema (Figura 4.48) apto únicamente para simulación del sistema físico, en el que la diferencia radica en el regulador. Consta de una constante proporcional que a priori no debe ser muy alta para evitar una variación brusca de la salida del sistema. Este factor tiene aún más sentido en el control de fuerza, ya que de cara a su uso sobre el prototipo, el paciente puede sufrir un tirón importante que dañe su dedo o su mano. Por este motivo, se busca que la dinámica del sistema sea progresiva y no instantánea.

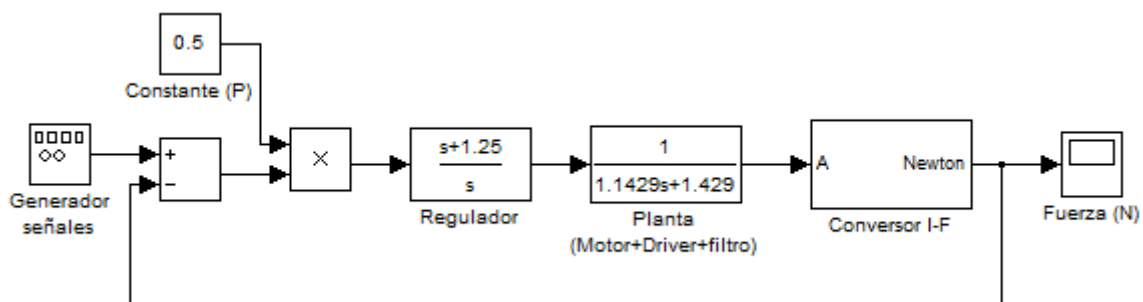


Figura 4.48 Esquema control de fuerza con f.d.t. experimental (cancelaciones).

Cuando se verifica que el esquema de simulación representa fielmente el sistema real, se procede a ejecutar diferentes simulaciones con el objetivo de ajustar los parámetros del regulador, en este caso, la constante proporcional y la posición del polo.

El valor del cero del regulador ($p=-1,25$) corresponde al valor del polo de la planta, por lo que en este método no es un parámetro configurable.

$$1,1429s + 1,429 \rightarrow s + 1,25 \quad (4.26)$$

El valor elegido para la constante proporcional es de 0,5, que no representa un valor que pueda dañar al paciente y que sin embargo ajusta satisfactoriamente la salida al valor de referencia.

En cuanto a la situación del polo del regulador, permite ralentizar la dinámica del sistema obteniendo la respuesta deseada. En este caso se ha optado por un polo en el origen, lo que puede provocar dinámicas inesperadas en el modelo real.

Con esta configuración se obtiene la respuesta comentada a continuación (Figura 4.49).

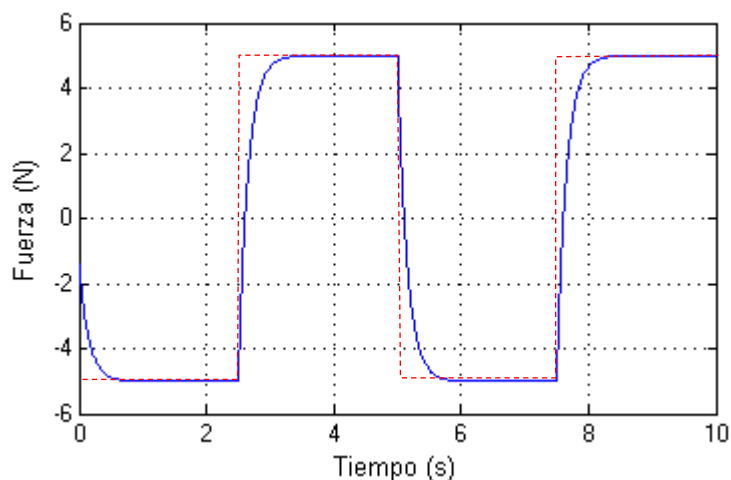


Figura 4.49 Respuesta control de fuerza simulada (cancelaciones).

En la Figura 4.49 se muestra la salida resultado de la parametrización comentada anteriormente. En rojo también se observa la comparativa con la señal de referencia, pudiéndose apreciar de forma clara el efecto del regulador implementado.

La respuesta obtenida de dicho control es similar a la obtenida mediante el método clásico, lo que proporciona una garantía más de cara al ensayo sobre el sistema físico.

Ensayo

Para dicho ensayo se ha implementado el esquema de la Figura 4.50, en el que se unifican el esquema de simulación de la Figura 4.48 con el esquema general de los ensayos realizados.

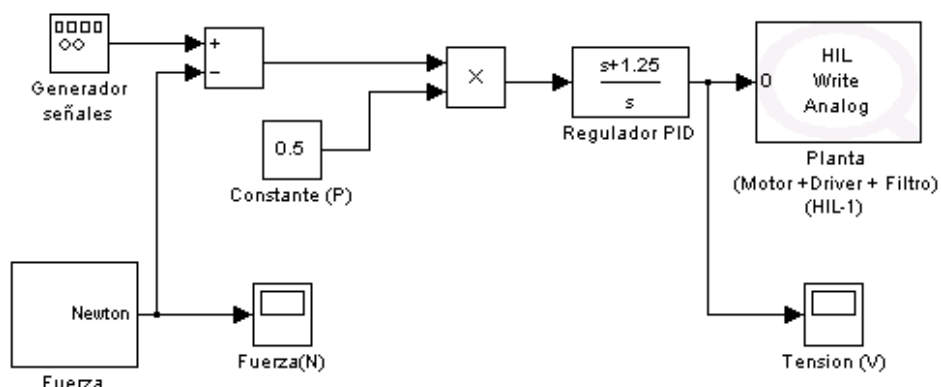


Figura 4.50 Esquema real control de fuerza (cancelaciones).

Una vez más, en este ensayo se ha requerido transformar el esquema para adaptarlo a los dispositivos existentes en el sistema. Por otro lado, el bloque denominado “Fuerza” engloba el sistema del apartado 4.6 de medida de fuerza, en la que se transforma la señal sensada de diferencia de potencial hasta obtener fuerza como magnitud final.

Además de monitorizar la fuerza, se han incorporado monitores para visualizar, igual que en el ensayo del método clásico, otras magnitudes como la corriente, el par y la tensión introducida al motor.

La señal de tensión de entrada al motor (vía driver), proviene de la salida proporcionada por el regulador. Esta señal se muestra en la Figura 4.51. Como es previsible, las respuestas de todas estas magnitudes son semejantes a las observadas con el método clásico. En el caso de la tensión introducida al motor, también ahora se observan picos que responden al mayor error respecto de la señal de referencia. Tras dichos picos, la tensión se estabiliza en torno a 1V, tensión que corresponde a una fuerza constante de 5N, que es el valor de estabilización.

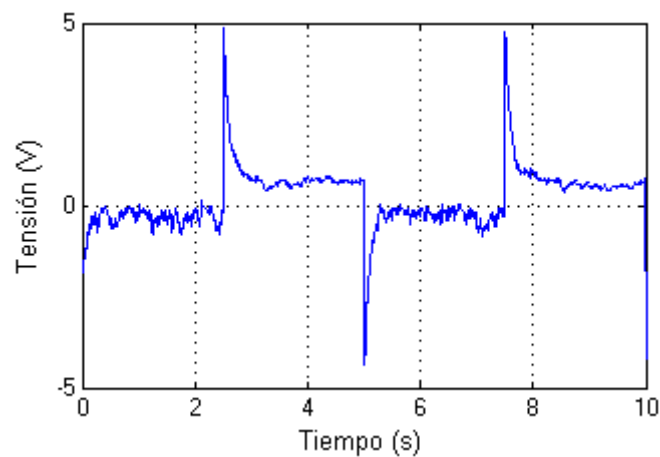


Figura 4.51 Tensión de entrada al motor (cancelaciones).

En cuanto a la señal de corriente absorbida por el motor (Figura 4.52), tiene la forma idéntica que la señal de par y de fuerza, exceptuando el valor alcanzado, ya que estas tres magnitudes tienen asociado un escalado diferente.

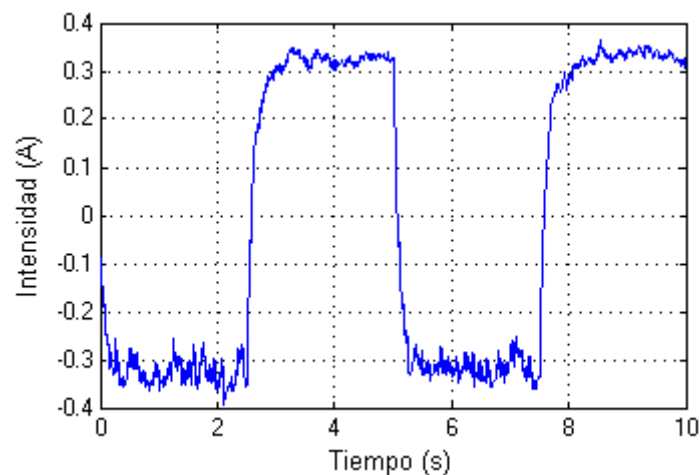


Figura 4.52 Control de corriente (cancelaciones).

A su vez, la respuesta controlada de par revela que para las condiciones dadas, el par máximo correspondiente a una fuerza estabilizada de 5N, es aproximadamente de 0,012Nm. Este valor es razonable puesto que siguiendo las hojas de características del motor (Anexo A4), se especifica que el par máximo desarrollado es de 70mNm.

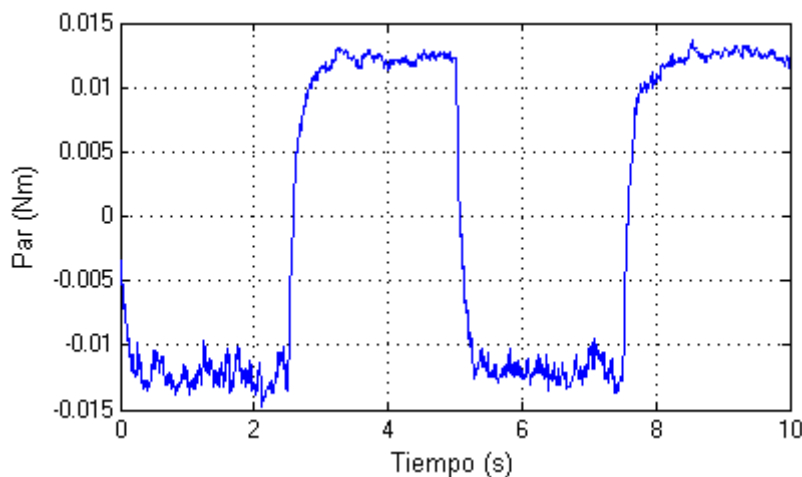


Figura 4.53 Control de par (cancelaciones).

La misma situación se produce en lo que a fuerza se refiere (Figura 4.54). En este caso se ha incorporado la señal de referencia (rojo) para apreciar la dinámica conseguida por regulador.

Como se observa, la señal se estabiliza entorno a 5N, tal y como estipula el generador de señales. Este valor va asociado a un eje de 5mm de diámetro. Si se acoplara una polea, un tambor o cualquier otro artilingio que modifique la distancia de acción de la fuerza, este valor se verá afectado.

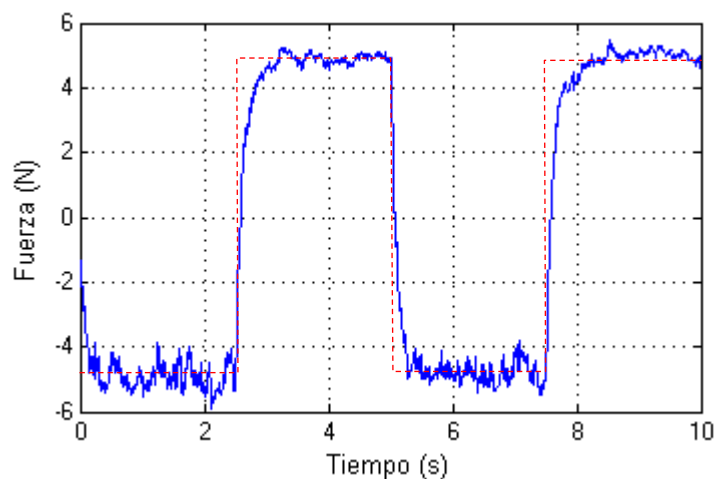


Figura 4.54 Control de fuerza (cancelaciones).

Como se muestra en la Figura 4.54, el lazo de control implementado es muy similar al conseguido con el método clásico. En este caso, también queda demostrado que el estudio hecho mediante simulación ha sido fructífero y ha permitido controlar una magnitud tan importante para este proyecto como la fuerza. Sin embargo, el valor de estabilización no se ajusta exactamente al indicado, ya que se trata de una magnitud con mucha inercia, como ya se ha explicado en el anterior apartado (4.7.1).

Queda comprobado que el sistema ha sido controlado de manera correcta y adecuada para la función que le será otorgada.

4.7.3 Lógica difusa

Se trata de una técnica de control muy intuitiva pero a la vez laboriosa. Trata de guiar la señal de entrada a través de un árbol de decisión para llegar a una salida tras haber recorrido un determinado camino. La complejidad en la implementación de este tipo de diseños ha hecho que se decida ser utilizados sólo en el control de fuerza, que es el que se busca desde un principio.

En este caso se desea realizar una comparativa de varios métodos de control, por lo que se ha implementado un esquema de este tipo y con un funcionamiento radicalmente distinto a los anteriores.

Para realizar un control de fuerza del sistema utilizando la lógica difusa, se ha de controlar partiendo de la variación de posición del eje del motor.

Como se puede seguir en la Figura 4.55 existe un valor de referencia o consigna de posición (Constante) que está fijada a 0 radianes. La idea consiste en que mediante diferentes caminos de decisión, la entrada al driver y al motor (Planta en el esquema), sea proporcional a la desviación del valor de posición respecto de la consigna. En esencia se trata de un regulador clásico tipo proporcional al que se le ha incorporado dos tipos de ajuste para evitar la inestabilidad del sistema.

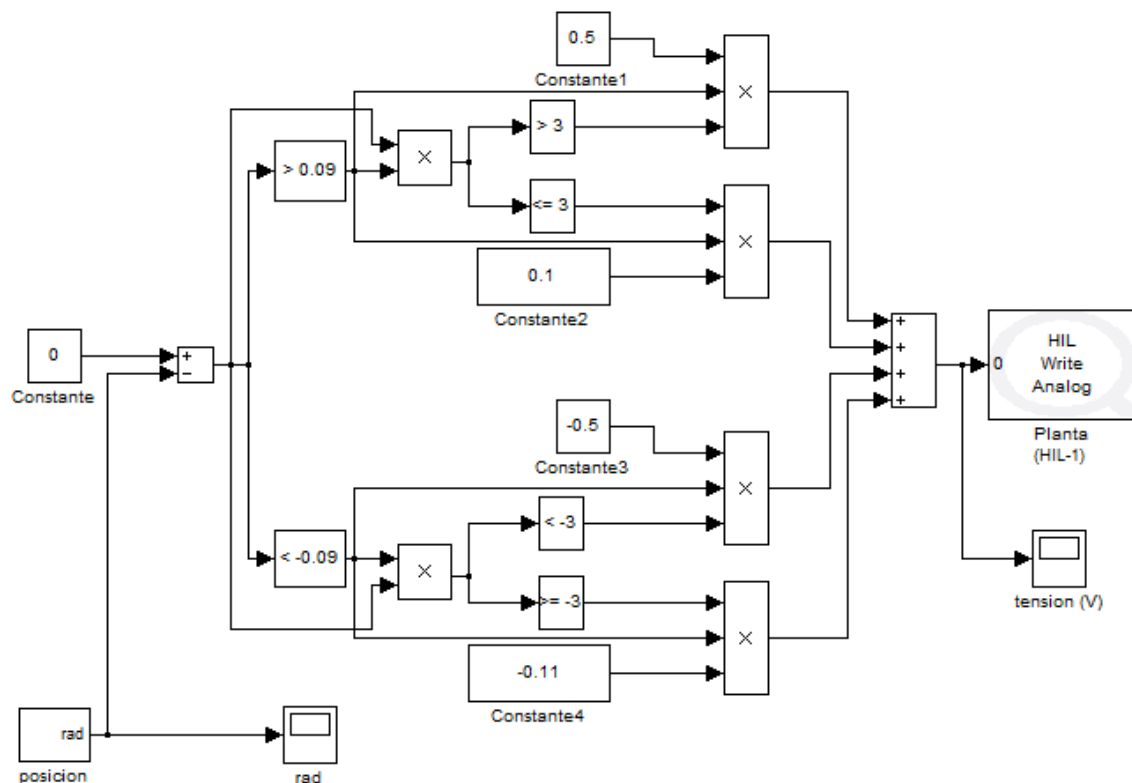


Figura 4.55 Esquema control de fuerza (fuzzy).

Volviendo al esquema de la Figura 4.55, de la misma manera que los otros métodos de control ya realizados, se parte de un error o desviación respecto del valor de referencia. En este caso, la referencia está medida en radianes, por lo que se ha diseñado un bloque que lo permita. Dicho bloque engloba el esquema ya estudiado en la Figura 4.6. Sin embargo se ha incorporado un bloque de valor absoluto en la salida para evitar que el error siempre sea positivo.

El error calculado, se evalúa mediante la primera de las decisiones del esquema:

- si el error es positivo y mayor que 0,09 radianes, se desvía la señal hacia la zona superior del esquema.
- si el error es negativo y mayor (en valor absoluto) que 0,09 radianes, la señal se orienta hacia la parte baja del esquema.
- por último, si la señal es menor en valor absoluto que 0,09 radianes, la señal no avanzará por el cuadro, introduciendo a la planta un valor nulo de tensión. Esta situación es la que se ha tomado como satisfactoria para la estabilización de la señal de posición controlada.

Tanto la parte superior del esquema como la inferior son idénticas estructuralmente, pero los valores de las constantes de decisión sí varían. Esta es la única razón por la que se ha decidido separar ambos casos y no introducir un bloque de valor absoluto, ya que en ese caso tanto error positivo (por debajo del valor de referencia) como negativo (por encima del valor de referencia) tendrían que ser tratados de la misma manera, y más adelante se verá que no es así.

Es conveniente destacar que la salida de un bloque de comparación es booleana, “1” ó “0”, pero en ningún caso se obtiene la señal de entrada. Esto hace más caótico el diseño, ya que cada valor de este tipo de bloques debe ser multiplicado a su vez por la señal de entrada, que es el valor de error calculado.

Por lo tanto, con la primera toma de decisión se determina el rango de posiciones en el que actuará el regulador, y si debe hacer avanzar el eje del motor, o por el contrario, retroceder.

A continuación, se vuelve a una nueva decisión que valorará si el error necesita un ajuste rápido y brusco, o un ajuste fino. Para ello se ha establecido otro bloque comparativo para diferenciar si el error es mayor o menor que un valor empírico (fijado a 3):

- en caso de ser mayor, se considerará necesario un ajuste rápido, siendo definida la constante proporcional con un valor absoluto de 0,5.
- si fuese menor, se precisará un ajuste fino, por lo que la constante proporcional debe ser también menor en valor absoluto. Se fija en 0,1.

Es en este momento donde se da sentido a la separación en dos partes diferenciadas del esquema. La constante de ajuste fino varía en función de si el motor debe girar en un sentido o en otro, y el motivo no es otro que los diferentes coeficientes de fricción que existen para cada sentido de giro. Si se decidiera unificar ambas partes del control, se tiene que la salida está

controlada en uno de los sentidos, pero en el otro se separa más de lo deseable del valor de referencia.

Conviene resaltar un punto que a priori puede dar lugar a confusión. En los multiplicadores, a la salida del ajuste, existen 3 entradas, dos de ellas redundantes, pero no lo son. Se trata de una medida de seguridad ya que los bloques comparativos con signos “<” pueden dar como resultado un “1” cuando no existe señal de entrada (equivale a valor 0).

Como se ha comentado al inicio de esta sección, se trata de un control de fuerza, y no de posición. Por este motivo, se ha incorporado el sistema de medida de fuerza diseñado para demostrar que el motor ejerce una fuerza proporcional al valor fijado de la constante proporcional, en este caso 0,5 ó 0,1. De esta manera se limita la fuerza ejercida por el motor y es configurable mediante el valor de las constantes ya mencionadas.

A continuación se procede al ensayo de este método de control y estudio de la respuesta.

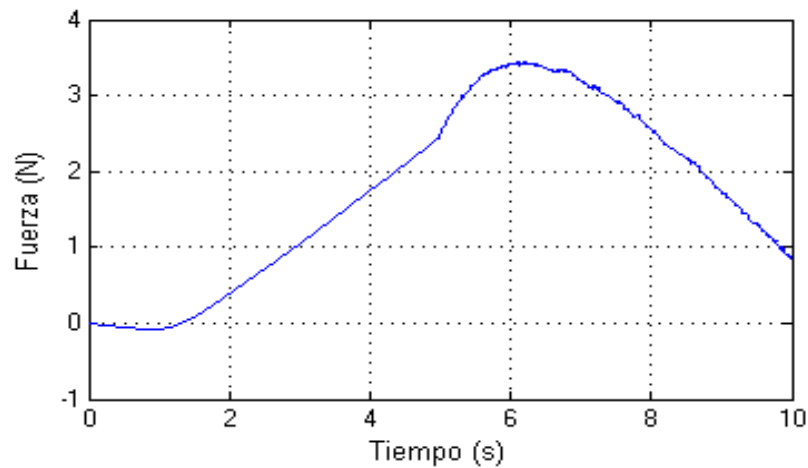


Figura 4.56 Respuesta fuerza (fuzzy).

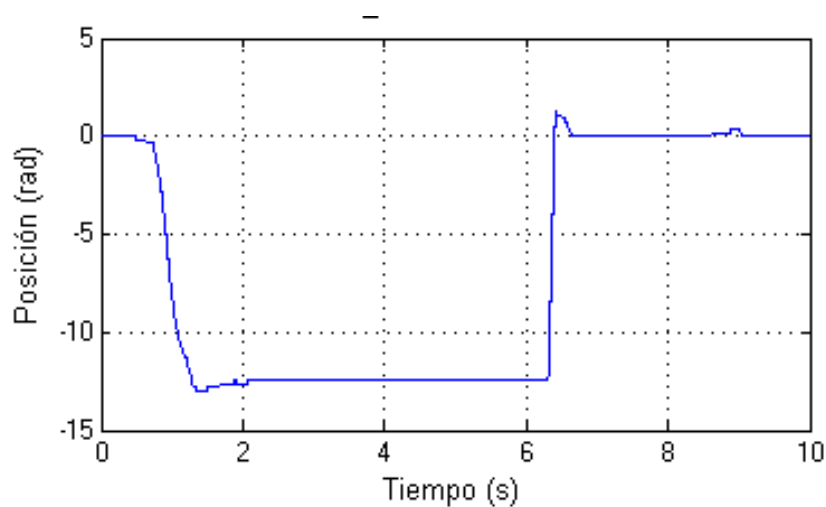


Figura 4.57 Respuesta posición (fuzzy).

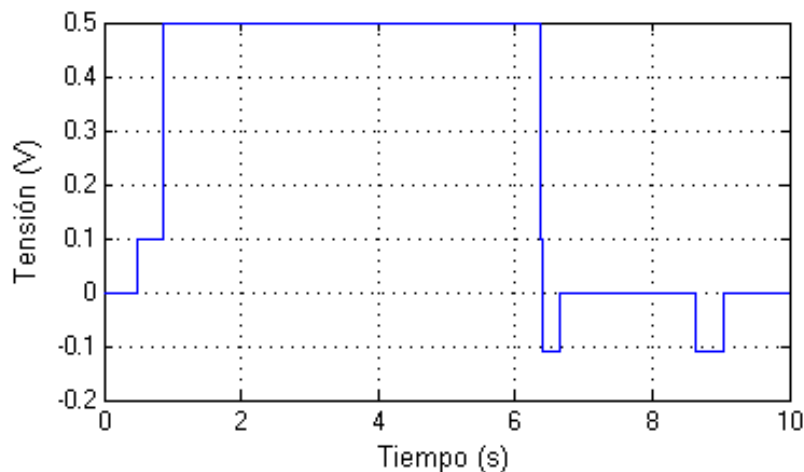


Figura 4.58 Entrada de tensión a la planta (fuzzy).

En la Figura 4.56 se observa la respuesta del esquema de control ante una perturbación en la posición del eje del motor. Como se observa, la posición sufre la desviación en torno a 1s del inicio del ensayo, y en ese instante la fuerza comienza a variar. A pesar de ello, se ve como el sistema es más lento que el resto de métodos estudiados. Más evidente es la dinámica del sistema de medida de fuerza si se contempla la Figura 4.58 respecto de la Figura 4.56 y la Figura 4.57, donde se ve como la tensión varía de manera inmediata a la perturbación, aplicando la constante correspondiente a un ajuste rápido. Sin embargo, esa inmediatez no se traslada a la respuesta de fuerza, que tiene una inercia mayor e invierte mayor tiempo en alcanzar un valor estable.

La causa probable de este hecho es la propia dinámica del sistema de medida, que como conviene recordar, incorpora un filtro que ralentiza la respuesta. Es evidente que el motor recibe la tensión instantáneamente, y por ello, la corriente consumida también responde de manera rápida, aunque existe cierta inercia. Como conclusión se puede extraer que la limitación principal reside en la medida de corriente y fuerza, algo que es previsible dados los problemas a la hora del diseño. Aun así el estudio es satisfactorio, ya que es posible controlar la fuerza ejercida por un motor sin sensores de corriente, par o fuerza lo que abarata los costes del prototipo sensiblemente.

4.7.4 Integración posición y fuerza

Este tipo de control trata de controlar la fuerza a la vez que ajusta la posición del eje del motor. Es un tipo de ajuste muy ambicioso y por ello se ha elegido como último método de control para este proyecto. En la Figura 4.59 se muestra el esquema del control ideado para lograr controlar ambos parámetros a la vez.

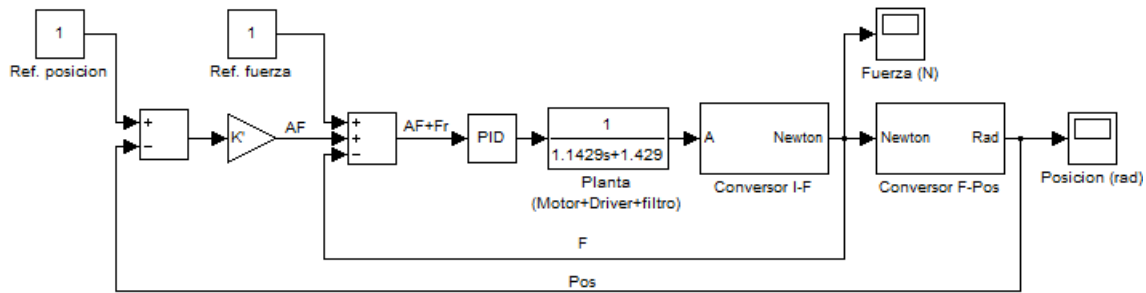


Figura 4.59 Esquema general control integrado (posición-fuerza).

Partiendo de este esquema (Figura 4.59), se procede a la explicación del funcionamiento del sistema.

En el esquema existen dos lazos de control separados, uno de fuerza y otro de posición. El de fuerza es idéntico al sistema implementado de la Figura 4.40, con la salvedad de que varía el valor de referencia. Dicha referencia viene derivada del segundo de los lazos, el de posición.

El lazo de control de posición tiene la estructura general de un sistema de control clásico con un regulador proporcional puro (K'). Para la correcta inserción de ambos controles, es preciso convertir la señal de fuerza en señal de posición. Para esta función se incorpora el bloque denominado “Conversor F-Pos”, a cuya salida se muestrea la posición medida en radianes. A su vez, esta señal se utiliza, como habitualmente, para la generación de la señal de error, mediante la diferencia con el valor de referencia de posición (Ref. posición).

La constante proporcional que actúa como regulador viene determinada por la relación existente entre posición (entrada del regulador) y fuerza (salida del regulador). Esta circunstancia impone las magnitudes a relacionar, según lo cual se tiene:

$$\Delta F = K_1 \cdot \Delta x \quad (4.27)$$

$$\Delta T = K_2 \cdot \Delta \theta \quad (4.28)$$

$$\Delta T = \Delta F \cdot \Delta x \quad (4.29)$$

$$\Delta F = K_2 \frac{\Delta \theta}{\Delta x} \quad (4.30)$$

$$K' = K_2 / \Delta x \quad (4.31)$$

$$\Delta F = K' \cdot \Delta \theta \quad (4.32)$$

De las ecuaciones 4.27 a 4.30 se obtiene el valor genérico para la constante proporcional, y es el mostrado en la ecuación 4.31.

Una vez obtenido el valor del regulador del lazo de control de posición, queda por explicar la entrada al lazo de fuerza. Como se observa en la Figura 4.59, el error se consigue mediante la diferencia de, el valor de referencia (formada por la diferencia del valor “Ref. fuerza” y la salida del regulador P del lazo externo), y la señal muestreada de fuerza. Según esto, a la salida del sumador-restador se obtiene el error “ $\Delta F + Fr$ ”, donde Fr es “Ref. posición”. Este último valor representa el error de cualquier sistema de control, pero existe una peculiaridad de este método, y radica en esta circunstancia.

El error propiamente dicho sería la diferencia entre la referencia y la muestra. En este caso se le añade la aportación obtenida del lazo de posición. El valor fijado determinará el error, que en régimen permanente se espera que sea nulo, pero al sumarle dicha aportación, la señal de fuerza se estabiliza por encima del valor de consigna, concretamente en el valor “Fr+error”. De este modo se limita el error, y como consecuencia la rapidez del sistema. En el ensayo práctico se explicará un ejemplo real (Figura 4.60).

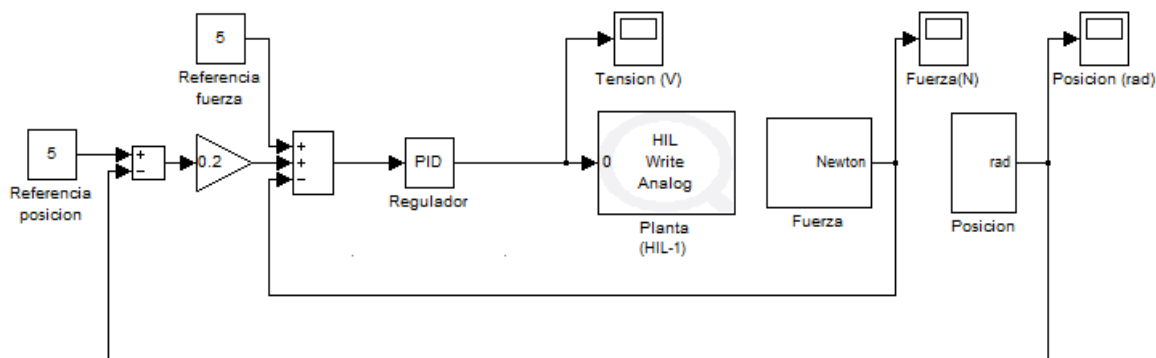


Figura 4.60 Esquema control de fuerza-posición simultáneo.

En este ensayo también se ha de modificar el esquema general para adaptarlo al sistema físico de que se dispone. Todos los bloques introducidos en el esquema de la Figura 4.60 ya han sido explicados y estudiados anteriormente. La mayor diferencia a resaltar es que no existe el bloque de conversión F-Pos como tal, sino que se trata de 2 bloques independientes sin nexo físico.

En cuanto al ensayo, se han fijado los valores de referencia para ambas magnitudes a 5N y 5rad (valores arbitrarios). El regulador PID está sintonizado de la misma manera que el esquema de control de fuerza de apartados anteriores. Y por último, el valor de K' se ha fijado a $0,2m^{-1}$. De esta forma, se tiene que para una referencia de 5rad, el valor límite (error máximo) de error de fuerza es de 6N (5N+1N), que es precisamente el valor obtenido en los ensayos (Figura 4.61).

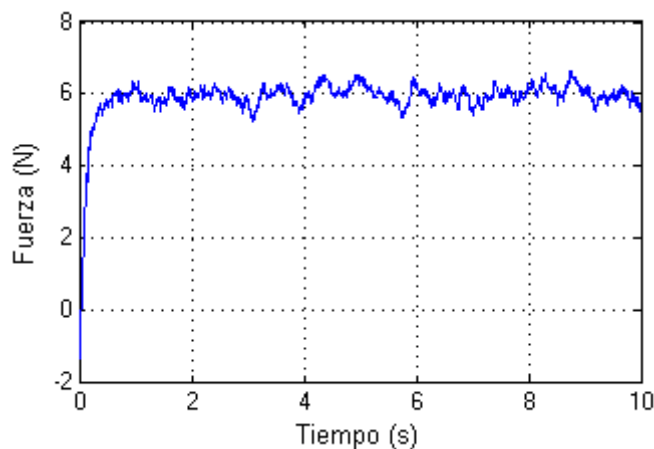


Figura 4.61 Respuesta fuerza (posición-fuerza).

Como causa directa de la respuesta mostrada en la Figura 4.61, se tiene la tensión introducida al conjunto motor y driver, y que aparece en la Figura 4.62. La forma de la señal es coherente,

ya que inicialmente el error es máximo, para lo que el regulador impone la máxima tensión de entrada al motor (en torno a 3,5V). a medida que el error se reduce, también lo hace la tensión hasta estabilizarse en 0,8V que corresponde a una fuerza ejercida por el motor de 6N.

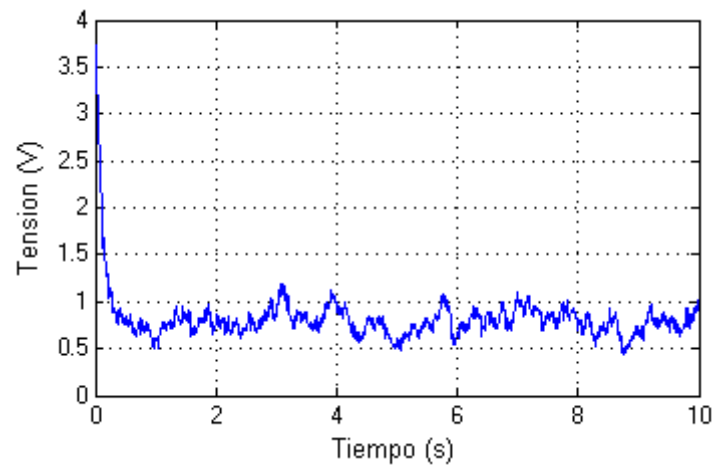


Figura 4.62 Tensión entrada a la planta (posición-fuerza).

Por otro lado, se observa (Figura 4.63) que la posición no alcanza en ningún momento el valor de referencia de 5rad.

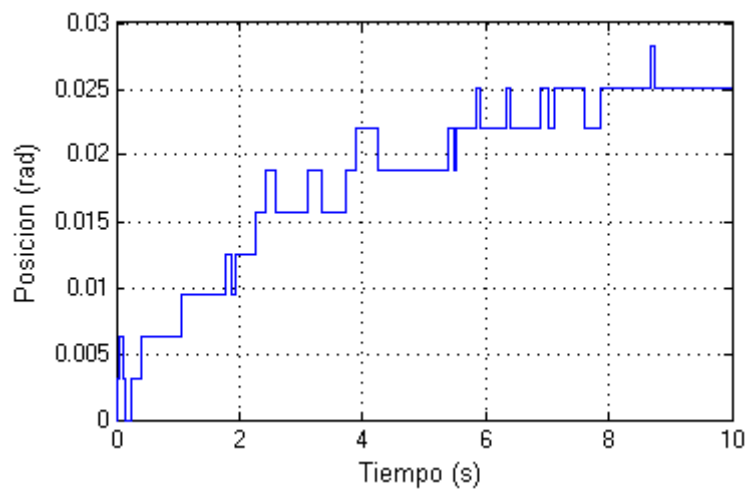


Figura 4.63 Respuesta posición (posición-fuerza).

Aunque se conozca el motivo de este hecho, no significa que el método sea válido. La idea principal es conseguir estabilizar ambas magnitudes por igual a los valores establecidos como referencia. Sin embargo, salvo coincidencia, no se logrará.

El método de control diseñado actúa únicamente sobre una variable del sistema, la tensión aplicada al motor. No obstante, se pretende controlar dos parámetros, obteniendo así un sistema incompatible y es que si se analiza la aplicación real del control implementado, se puede comprobar como sólo es posible controlar una de ellas, pero en ningún caso ambas simultáneamente.

El motor trabajando en vacío no ejerce par resistente y por supuesto ninguna fuerza. Este es el motivo por el que en su momento se resta la corriente de vacío para hallar la fuerza. Bajo esta premisa, para que el motor oponga resistencia, debe existir un par externo que se oponga al movimiento del eje del motor. Si no lo hay, estará funcionando en vacío. Por otro lado, el motor inmerso en el sistema de control analizado, y existiendo carga aplicada, tratará de alcanzar la posición de referencia. Para ello, es necesario que venza la resistencia que opone la carga. El problema está en que existen dos posibilidades:

- O bien el motor ejerce una fuerza suficiente para alcanzar dicha posición (superando o no la fuerza de referencia), con lo que únicamente se alcanza uno de los valores.
- O bien, el motor incrementa la fuerza ejercida hasta el valor de referencia de fuerza sin conseguir vencer la resistencia de la carga y por tanto sin alcanzar los 5 radianes.

Encontrarse en un caso u otro depende únicamente del peso de cada regulador de los introducidos. El de mayor peso conseguirá vencer al otro y alcanzar su valor de referencia. Es decir, si no hay carga, el motor no ejerce fuerza, por lo que el motor seguirá girando infinitamente hasta encontrar resistencia y poder entonces ajustar la fuerza. Por otro lado, el instante en el que se detecte la presencia de carga, salvo coincidencia, no corresponderá al valor deseado, consiguiendo que el motor ejerza 5N de fuerza con el eje en una posición cualquiera.

Por todo lo explicado, y tras el estudio del ensayo realizado, se concluye que el método no es válido. En cualquiera de las situaciones posibles mencionadas, este sistema no aporta ninguna ventaja respecto a los controles independientes de fuerza y de posición.

5 Prototipo

A lo largo de los capítulos anteriores, se ha explicado el funcionamiento de sistema completo atendiendo a los sistemas de control del motor y los estudios realizados para llegar a ellos, con el objetivo de construir un sistema capaz de ayudar en la rehabilitación de la mano de una persona que haya podido ver mermada su movilidad. Se pretende utilizar el movimiento de un motor para implementar un dispositivo que posibilite dicha rehabilitación. La idea fundamental es aprovechar la fuerza que genera el motor como consecuencia de su giro, para poder crear una resistencia que el paciente deba vencer mediante el movimiento de sus dedos.

Para que este objetivo pueda alcanzarse, es necesario el diseño y construcción de un prototipo que dé sentido a los estudios previos. Nótese que se llevará a cabo la implementación y el diseño de un único dedo, pudiendo ser ampliado, en caso de necesidad y disponibilidad de más hardware y tiempo.

El objetivo es que el paciente, mediante flexión y extensión de su dedo índice, sea capaz de interactuar con el sistema de control ya implementado. El primer problema que se plantea, es cómo acoplar los movimientos del dedo a los del motor. Para ello se utilizará un hilo de un determinado material que modela el tendón real que previsiblemente ha sido dañado. A continuación hay que garantizar que ese tendón transmita tensión al motor. Aquí surge la necesidad del exoesqueleto como mecanismo de transmisión de movimiento entre el motor y la mano. En la medida de lo posible deberá ser configurable para adaptarse a las posibles diferencias anatómicas entre pacientes.

La adaptación física de los sistemas de control con el movimiento del paciente requiere determinadas modificaciones en el eje del motor. Con el fin de evitar que el tendón artificial se enrolle sobre el eje del motor obstaculizando su giro, se hace imprescindible la construcción de

un tambor junto con un soporte y un rodamiento para que el control de fuerza sea más efectivo. De esta manera, se consigue que una mayor longitud de hilo enrollado por cada revolución del motor.

Por último, se construirán dos plataformas. Una de ellas tendrá la función de contener todos los dispositivos del sistema, tales como fuente de alimentación, driver, motor, etc. La otra plataforma deberá sujetar el brazo del paciente para que el sistema tenga resultados fiables.

A continuación se describirán más en profundidad cada uno de estos elementos.

5.1 Exoesqueleto

La necesidad del exoesqueleto surge como posible solución a los problemas de transmisión de movimiento entre motor y dedos. Es la parte más importante del prototipo, dado que de él depende la correcta sincronía entre el paciente y el sistema, y por ello la que más investigación e ingenio ha requerido.

El objetivo es la construcción de una estructura que envuelva la mano del paciente y permita la inserción del tendón artificial para poder trasmitir el movimiento del dedo al eje del motor. Existen diferentes sistemas que cumplen esta premisa, pudiendo ser clasificados según sean rígidos o flexibles. Los denominados rígidos son más fiables y complejos que los flexibles, siendo necesario un diseño mecánico exhaustivo para adaptarse a los requerimientos del sistema. Como vemos en el prototipo de la Universidad Católica de América, HEXORR (Figura 5.1), se trata de un sistema rígido en su mayor parte, pero con cintas ajustables de velcro para permitir su adaptación a los diferentes tamaños de mano de cada paciente.

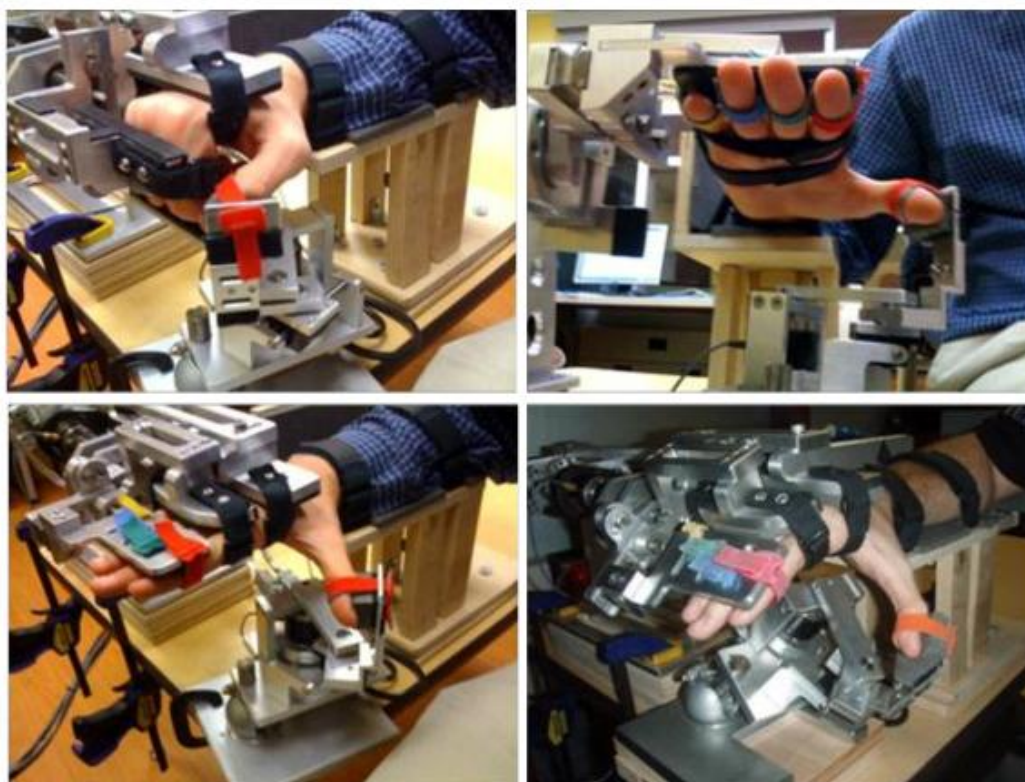


Figura 5.1 Prototipo HEXORR.

Prototipo

Por el contrario, se observa la existencia de exoesqueletos flexibles como el diseñado por la empresa *Cyber Glove Systems* [12] (Figura 5.2). Este último proyecto no tiene fines médicos sino de realidad virtual. La aplicación es diferente aunque el funcionamiento es similar. Se pretende recrear el sentido del tacto en realidad virtual, generando una fuerza de resistencia cuando se produce el contacto virtual.



Figura 5.2 Prototipo CyberGlove.

Para ello, se ha investigado el funcionamiento real de los tendones de los dedos para intentar reproducir de manera artificial la perfecta sincronía de la mano de un ser humano.

En la Figura 5.3 se muestra un esquema de la anatomía de la mano y de su funcionamiento. Los tendones se alojan en unas vainas que funcionan a modo de guía y que permiten el deslizamiento del tendón sin desplazarse de su ubicación natural. Estas vainas, junto con el retináculo extensor, dan una sujeción adecuada para el movimiento del tendón.

Para poder entender mejor la fisonomía y funcionamiento del dedo, se procede a exponer algunos conceptos básicos.

Basándose en un corte sagital de la Figura 5.4, se explican cada uno de los elementos más importantes involucrados en el movimiento.

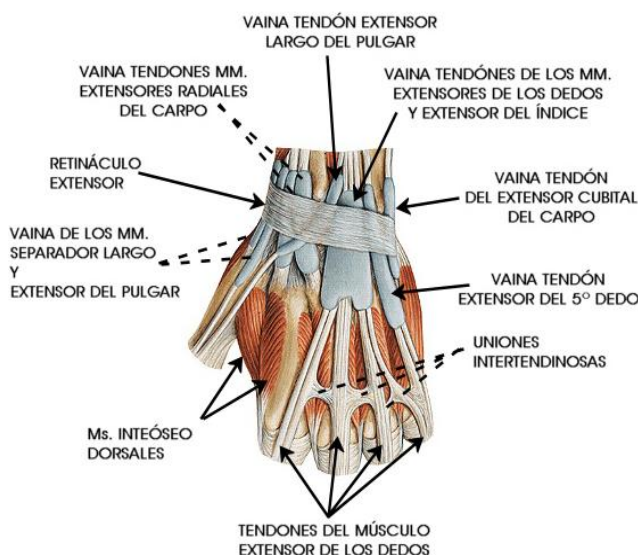


Figura 5.3 Distribución de tendones en la mano.

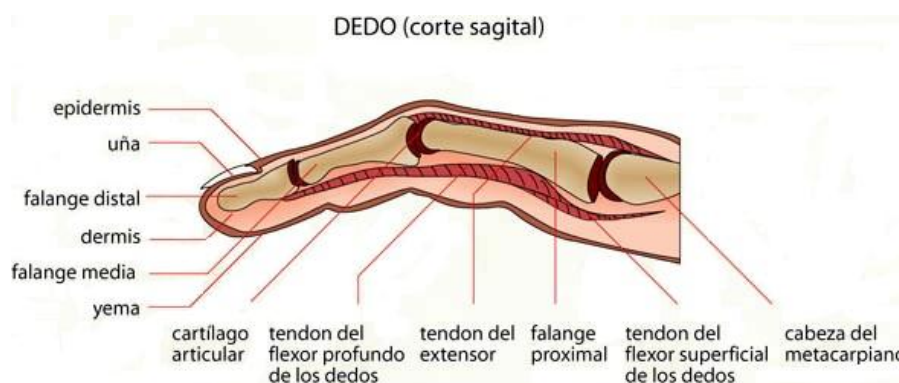


Figura 5.4 Corte sagital de un dedo.

Dedo: apéndice articulado que termina la mano.

Cabeza del metacarpiano: parte superior del hueso de metacarpo.

Tendón del flexor superficial de los dedos: cordón de tejido que conecta el flexor superficial de los dedos con la falange.

Falange proximal: primera falange.

Tendón del extensor: cordón de tejido que conecta el extensor con la falange.

Tendón del flexor profundo de los dedos: cordón de tejido que conecta el flexor profundo de los dedos con la falange.

Cartilago articular: sustancia elástica que permite la flexibilidad de las articulaciones entre las falanges.

Yema: parte carnosa situada en la punta de los dedos.

Falange media: segunda falange.

Dermis: tejidos que forman la capa central de la piel.

Falange distal: tercera falange.

Uña: lámina córnea situada en la extremidad de los dedos sobre el lado dorsal.

Epidermis: tejidos que forman la capa superior de la piel.

El siguiente paso es conocer el punto de inserción del tendón en el hueso, ya que de esto dependerá que el movimiento del exoesqueleto sea natural o no. Como se ve en la Figura 5.4, el tendón superior es el que utilizamos para extender el dedo y se inserta en la parte inferior de la falange media. Por otro lado, el tendón del flexor se inserta en la parte inferior de la falange distal, lo que provoca que los movimientos de ambas falanges, distal y media, estén acoplados, es decir, salvo raras excepciones, no se puede mover naturalmente una falange sin actuar también sobre la otra.

Como se indicó anteriormente, un requisito importante del prototipo es que sea adaptable a la mano y dedo de cualquier paciente que lo pueda necesitar. Por este motivo se consideró la posibilidad de construir un modelo rígido parametrizable, pero por cuestiones de tiempo y de diseño se escapa de los plazos establecidos para el proyecto. En la Figura 5.5 se observa un boceto de un posible exoesqueleto rígido pero que ha sido descartado por los problemas que presenta al intentar hacerlo ajustable, ya que sería preciso un diseño mecánico complejo, lo cual queda fuera del alcance de este proyecto.

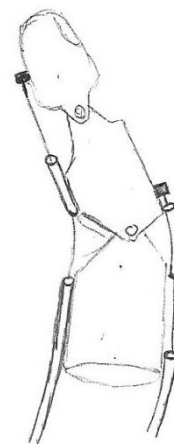


Figura 5.5 Boceto
exoesqueleto rígido.

Prototipo

Por tanto, la opción elegida ha sido la de un exoesqueleto ajustable construido con cintas de velcro, lo que facilita de manera muy significativa las tareas de diseño y construcción.

El motivo de la elección de este sistema es la versatilidad, maleabilidad, coste, flexibilidad y la facilidad de confección, ya que se pretende que el velcro se adapte al dedo perfectamente para poder, más adelante, insertar el tendón en una pieza construida para la punta del dedo. Estas características hacen de este material el más idóneo para la construcción del exoesqueleto

Previamente, se debe confeccionar cada una de las cintas cosiendo en uno de sus extremos una pequeña pieza de cinta de su lado opuesto, que será la que permita la fijación de la cinta alrededor de la mano o del dedo. Para dicha confección es aconsejable el uso de hilo resistente ya que las cintas estarán sometidas a un cierto nivel de esfuerzo.

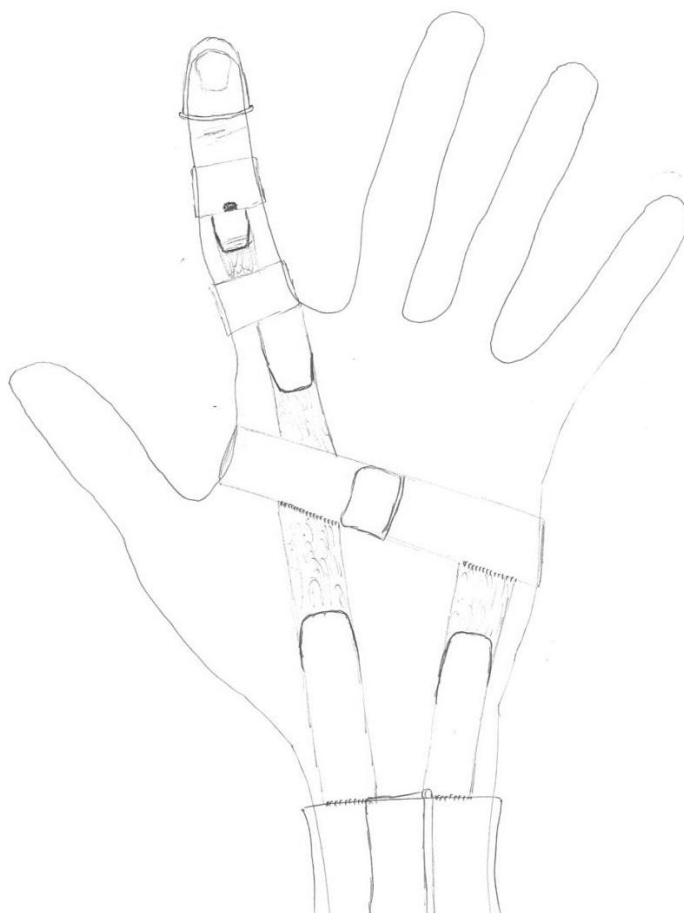


Figura 5.6 Boceto exoesqueleto flexible.

Una vez confeccionadas las cintas, se ha de idear la forma más interesante de ensamblar las cintas para que el exoesqueleto tenga consistencia. Como se observa en el boceto de la Figura 5.6, se propone utilizar unas cintas transversales que abracen la mano y el dedo. De estas cintas partirán a su vez otras de menor longitud, que se unan entre ellas a la distancia necesaria para que el exoesqueleto quede perfectamente ceñido a la mano. De esta manera, se consigue que este diseño sea apto para muchos tamaños de manos.

Este método genera una serie de problemas que se resumen en ser capaces de que las cintas de velcro alojen el tendón a lo largo de todo el dedo y que el propio velcro se adapte adecuadamente a las curvas de las falanges. Se comprobó, basándose en el concepto de fibra neutra de resistencia de materiales, que no sería posible que la cinta se adaptase a las falanges sin realizar una serie de cortes estratégicos en la parte superior del velcro, que es incapaz de ceder. Por ello se optó por adaptar la parte inferior del velcro a la falange y colocar trozos menores en la parte superior, de manera que el tendón quede aprisionado entre ambas partes de la cinta de velcro. Debido a la estructura de fijación del velcro, el hilo podrá deslizarse fácilmente pero no desplazarse transversalmente. Con este sistema se consigue una acción similar a la que hacen las vainas en el interior de la mano de una persona. Únicamente se empleará a lo largo de la longitud del dedo. El resto del recorrido tendrá lugar a través de un tubo a modo de vaina que guiará el hilo hasta su inserción en el tambor.

Como ya se ha comentado anteriormente, un problema surgido durante la construcción del prototipo es el modo de insertar el hilo en el exoesqueleto. Como solución se propone una pieza rígida que se acople a la punta del dedo, de manera similar a un dedal, y en dicha pieza realizar la unión. Sin embargo, este método conlleva un problema que no se consideró inicialmente, y es que al ser el dedal demasiado corto, provoca que al tirar el tendón de él, éste gira sobre el dedo y se descoloca oprimiéndose contra el dedo. Como consecuencia, el tendón desliza directamente sobre la piel del paciente pudiendo llegar a provocar cortes y rozaduras. Tras diversas pruebas con diferentes piezas con la forma tradicional de dedal, se diseñó una variante mostrada en la Figura 5.7. Esta pieza se fabrica con un material polimérico en una impresora 3D.

El diseño de esta pieza tiene un motivo puramente funcional. Como ya se ha comentado, si es demasiado corto, el hilo acaba deslizando sobre la piel del paciente. Con esta forma, la parte alta cubrirá perfectamente la falange impidiendo que en el momento de la flexión, el hilo entre en contacto con la piel, tal y como se ve en la Figura 5.7. Además, al tener una mayor altura, se adapta de mejor manera a la falange, evitando que la pieza gire sobre el dedo.



Figura 5.7 Pieza punta del dedo.

Este elemento, siguiendo con los requerimientos iniciales, puede ser imprimido en un tiempo más o menos corto para cualquier tamaño, o incluso tener varios modelos con puntas intercambiables para adaptarse al paciente.

5.2 Tendón

Se trata del elemento clave del prototipo, ya que es el que transmite el movimiento del motor al dedo y viceversa. El resto de elementos son complementos y asistentes para el correcto funcionamiento de éste.

Prototipo

El tendón ha de ser de un material suficientemente resistente para no romperse ante la acción del dedo del paciente, pero también, lo bastante flexible para poder adaptarse al exoesqueleto sin que el dedo sea oprimido o dañado.

La primera opción considerada ha sido la de un tendón de acero. Tras varias comprobaciones sobre el exoesqueleto real, se ha considerado que no cumple el requisito imprescindible de la flexibilidad, es decir, es demasiado rígido y no es capaz de deformarse con radios pequeños, como en el caso de las articulaciones de los dedos. Además, la inserción en el exoesqueleto sería problemática dado que se trata de un material complejo de manipular. La inserción debe ser realizada en la pieza fabricada con la impresora 3D, y la unión no sería fácil dada la rigidez del hilo de acero.

Una vez descartado este material, se prueba con hilo de sedal, pues se adapta mejor a las necesidades. Esta nueva opción se amolda perfectamente a la forma del dedo y de la mano. Sin embargo, tiene una desventaja evidente frente al hilo de acero en cuanto a su resistencia mecánica. A pesar de ello, su resistencia resulta suficiente para el esfuerzo típico al que se verá sometido durante la flexión del dedo del paciente.

Para comprobar la validez del sedal como elemento transmisor de esfuerzos, se debe conocer la máxima resistencia a la tracción que soporta el material, y compararlo con un valor estimado de la fuerza que puede ejercer un solo dedo.

Con la ayuda de un dinamómetro, se estima que en el caso del hilo empleado está en entorno a los 3 Kg de fuerza. Con este dato es posible establecer una comparación entre sedal y acero y determinar la validez de cada uno.

$$\text{Fuerza necesaria estimada: } F = m \cdot g = 3Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \approx 30N \quad (5.1)$$

$$F = \sigma \cdot S \quad (5.2)$$

Donde σ es la tensión y S es la superficie efectiva del hilo. Por tanto, se tiene:

$$F = 400MPa \cdot 1mm^2 = 400N \quad (5.3)$$

Máxima fuerza (acero): 400N

Máxima fuerza (sedal): 50N

El valor máximo de fuerza del sedal viene determinada por las especificaciones aportadas por el fabricante.

Además de garantizar el buen comportamiento mecánico en cuanto a ergonomía y resistencia, este tendón ha de ser guiado por el sitio correcto para que el sistema sea funcional. De no ser así, el sistema completo podría no resultar eficiente, por lo que la elección del sistema de guiado es tan importante como la elección del material del tendón.

La forma de guiarlo es un tubo de longitud determinada que ha de ser fijado en sus extremos. El funcionamiento es exactamente el mismo que la camisa del freno de una bicicleta donde

uno de los extremos se acopla a la base soporte, en nuestro caso con una argolla incrustada y el otro al exoesqueleto, aprovechando la sujeción proporcionada por las cintas de velcro.

5.3 Base sujeción

Este elemento evita el movimiento del brazo del paciente. Se trata de una base de madera que funciona como bancada del prototipo. De esta forma se restringe la movilidad del brazo en una posición fija.



Figura 5.8 Base sujeción.

Está formado por una tabla de madera de pino con unas dimensiones que permiten el asentamiento del antebrazo para que el exoesqueleto pueda funcionar correctamente.

Para lograr la sujeción se colocan dos cintas de velcro que juntando sus extremos, fijan el antebrazo a la base de madera. Mediante grapas, las cintas son

fijadas a la base.

Además, con la intención de evitar el deslizamiento de la base respecto a la mesa, o la superficie donde se coloque el sistema, se han incorporado unos pequeños tacos de goma en cada esquina de la superficie de contacto (Figura 5.9).



Figura 5.9 Detalle taco de goma.

5.4 Base soporte

Es una estructura construida con madera con el propósito de albergar todos los dispositivos físicos utilizados. Tiene un tamaño similar a la base de sujeción, pero consta de dos alturas en las que se alojarán:

- Primera altura:
 - Placa de desarrollo
 - Fuente de alimentación
 - Divisor resistivo para alimentación del freno
- Segunda altura:
 - Driver
 - Motor
 - Tambor

Esta colocación pretende que todos los elementos sean accesibles, a la vez que resulte una estructura compacta, haciendo un sistema fácilmente transportable.

en la Figura 5.10 se muestra un boceto a mano alzada del diseño de la base soporte.

Prototipo

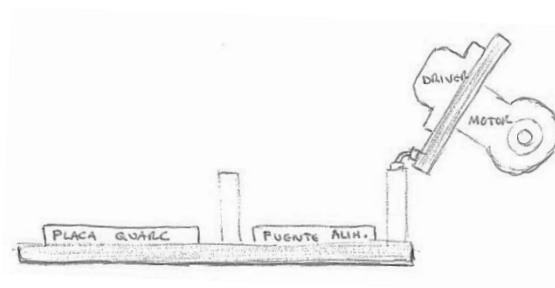
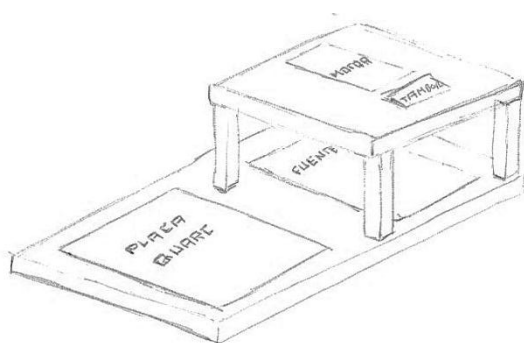


Figura 5.10 Boceto base soporte.

El diseño es asimétrico otorgando mayores dimensiones a la primera altura. De esta manera, la placa de desarrollo está accesible, y se puede realizar cualquier conexión en la misma de una manera rápida y simple.

La segunda altura se ha hecho abatible para optimizar el espacio y mejorar la maniobrabilidad. En la parte superior está colocado el motor (en su soporte) junto con el apoyo que sujeta el tambor, mientras que en la parte inferior se encuentra el driver, quedando oculto cuando se cierra. Este abatimiento ha generado problemas a la hora de la construcción ya que se han utilizado dos bisagras alojadas en los listones que soportan la segunda altura y la ejecución de los taladros no ha sido buena. Como es previsible, el diseño se ha complicado al introducir el abatimiento. Sin embargo, este hecho resulta muy beneficioso en términos de comodidad de operación.



Figura 5.11 Base soporte.

Los cables de conexión han sido ubicados de manera que no entorpezcan el acceso al resto de dispositivos, para lo cual se ha perforado la base convenientemente.

Por último, es importante mencionar la misma circunstancia dada en la base de sujeción de evitar el deslizamiento con una serie de tacos de goma. Estos tacos, además de fijación, ofrecen una pequeña amortiguación que elimina vibraciones incómodas.

5.5 Tambor

El tambor es la pieza que se acopla al eje del motor y hace más eficiente la medida de fuerza ejercida por el motor, y como consecuencia, su control.

La introducción de un tambor acoplado al eje del motor tiene una razón de mucha importancia. En un principio, el control y la medida de fuerza se ensaya con un cordón unido directamente al eje, lo que provoca que el cordón se enrolle en el eje dificultando su movimiento. Al cabo de pocas revoluciones, el cordón comienza a enrollarse sobre sí mismo, provocando que el radio del eje del motor se incremente de manera gradual. Por este motivo, la medida de fuerza resulta poco fiable. Por ello se ha diseñado un tambor que nos permite aumentar el diámetro donde enrollar el hilo y tener así una medida real y más uniforme.

Este elemento tiene una repercusión directa sobre el par y la fuerza. La relación entre estas magnitudes es $T = F \cdot d$, donde “d” es la distancia desde la línea de acción de la fuerza hasta el punto donde se requiere conocer el par (concretamente se trata del eje del motor). Según esta ecuación, al aumentar el radio del eje, que pasa a ser el radio del propio tambor, se aumenta la distancia, por lo que la fuerza ejercida disminuye. La razón de que el par sea constante es que esta magnitud viene determinada por la corriente absorbida por el motor, luego la fuerza es la consecuencia de generar el par, y no al contrario.

Por motivos de seguridad, se hace necesaria la colocación de un apoyo, para repartir el peso y no otorgar toda la carga al eje del motor. Además, se colocará un rodamiento que reduzca la fricción entre el tambor y dicho apoyo. El despiece de la Figura 5.12 se muestra el primer modelo que se consideró para este mecanismo. Como se ve, existen dos apoyos. De esta manera, el motor no tendría que soportar esfuerzo alguno.

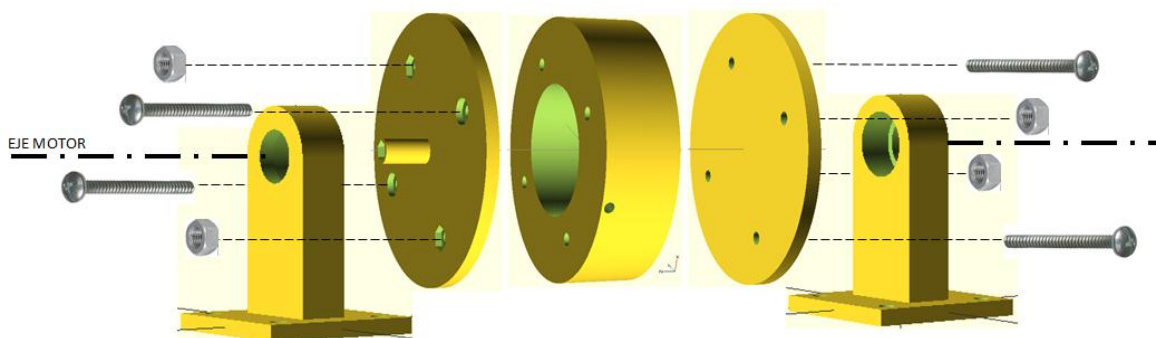


Figura 5.12 Esquema tambor con soportes.

Sin embargo, esta solución tiene un problema difícil de solventar con los medios disponibles. Al utilizar dos soportes que alojen los vástagos, es necesario garantizar la coaxialidad de ambos junto con los propios vástagos, ya que en caso contrario, se sometería al eje a unos esfuerzos que llegarían a deteriorarlo e impediría el correcto funcionamiento del mecanismo. Puesto que las piezas se fabrican en una impresora 3D, y su precisión no es lo suficientemente buena para evitar los problemas de falta de coaxialidad, hay que desechar este método.

Como segunda opción considerada, se modifica el esquema anterior de forma que únicamente se utilice un apoyo, mientras que el propio eje del motor hace la función del segundo apoyo. Esta solución tampoco es perfecta pero se consigue eliminar, en parte, los problemas de coaxialidad. El diseño elegido es el que se muestra en la Figura 5.13.

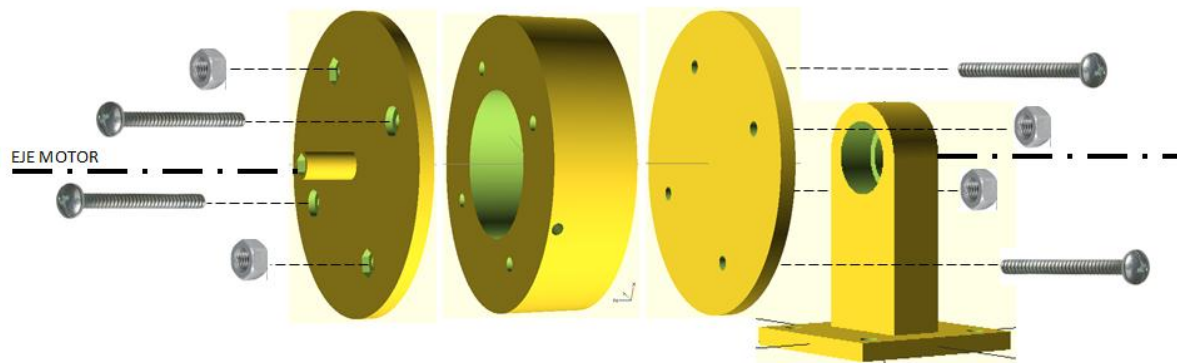


Figura 5.13 Boceto diseño seleccionado.

A priori puede parecer que el método de acoplamiento del tambor al motor no reviste dificultad alguna. Sin embargo, existe una problemática importante debido a la falta de rebajes y chaveteros en el eje del motor. Por ello, acoplar cualquier pieza resulta harto complicado.

La primera opción contemplada es el uso de un acoplamiento que mediante un par de apriete ejercido por una serie de tornillos, se consigue hacer dos ejes solidarios. Aunque esta solución puede parecer acertada a priori, las pequeñas dimensiones del eje del motor utilizado hacen casi imposible, y muy costosa dicha solución.

Tras muchas pruebas se optó por una tuerca bloqueante que ejerce un par de apriete para evitar el deslizamiento sobre el eje del motor. Para acoplar a su vez la tuerca al tambor, en uno de los vástagos donde se encajarán los rodamientos, se incluyó un agujero ciego hexagonal de las mismas dimensiones que la tuerca bloqueante. De esta forma se consigue que el tambor gire solidario a la tuerca, y como consecuencia, con el eje del motor. El detalle de lo explicado puede observarse en la Figura 5.14.

Como se ha indicado previamente, estas piezas se construirán con una impresora 3D, previo diseño con el programa OpenScad. Este programa es una herramienta CAD que permite el diseño de piezas sencillas en tres dimensiones y posteriormente exportar dicho diseño a un archivo de extensión válida para la impresión.

A continuación se mostrarán las piezas construidas y el procedimiento seguido para su diseño.

5.5.1 Tambor

La impresión de piezas en 3D con aporte de material tiene limitaciones de diseño, ya que no se puede reproducir cualquier pieza que se desee. En el diseño del tambor, fue necesario dividir la pieza en tres elementos distintos, ya que la forma ideada contenía ménsulas imposibles de realizar para la impresora.

Para llegar a un diseño óptimo de las piezas, se estudiaron medidas de los tornillos y tuercas a utilizar, y también de los rodamientos existentes en el mercado (Anexo A4). El resto de dimensiones son resultado del diseño y no responden a ningún otro criterio. Por lo anteriormente explicado acerca del agujero hexagonal, la medida exterior del vástago queda

limitada. Esta circunstancia junto con las medidas estándar de los rodamientos, determina la medida exacta del diámetro de dicho vástago, y como consecuencia, la medida exterior de dicho rodamiento fijará las dimensiones del agujero del apoyo en el que se alojará.

Cabe destacar que la parte central del tambor tiene dos orificios radiales a diferentes alturas, como se observa en la Figura 5.14. Su función es la de posibilitar la introducción del tendón (sedal) y fijarlo en el interior del tambor. El motivo de haber dos es por la posibilidad de incorporar un segundo tendón que permitiera la flexión del dedo.

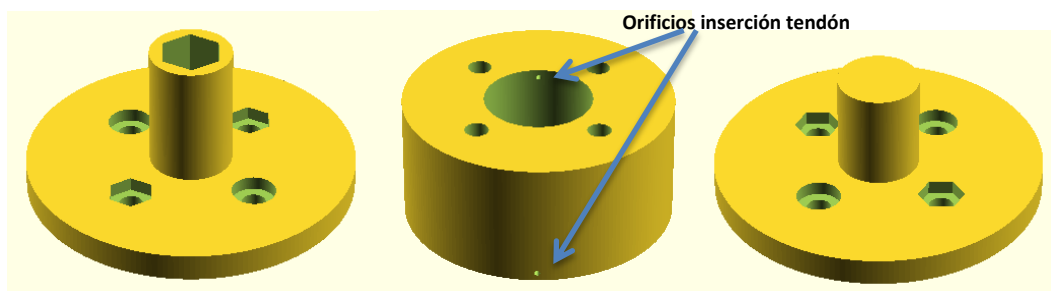


Figura 5.14 Despiece del tambor.

5.5.2 Apoyo

La función del apoyo es únicamente garantizar que el tambor permanezca en su posición de diseño y que el acoplamiento entre el eje del motor y el propio tambor esté perfectamente alineado en todo momento.

Como ya se ha mencionado, la medida del agujero para alojar el rodamiento ya está determinada según las tablas de dimensiones que se pueden encontrar en el Anexo A4. Se pretende efectuar un pequeño par de apriete entre ambas piezas que dé consistencia al sistema a la vez que los hace solidarios (Figura 5.15).

Además, el diseño del apoyo debe permitir el correcto asentamiento sobre la base soporte. La fijación se llevará a cabo con tornillos. Adicionalmente, se han realizado unos taladros avellanados en la base del apoyo para permitir que los tornillos de fijación sobre la base asienten correctamente.

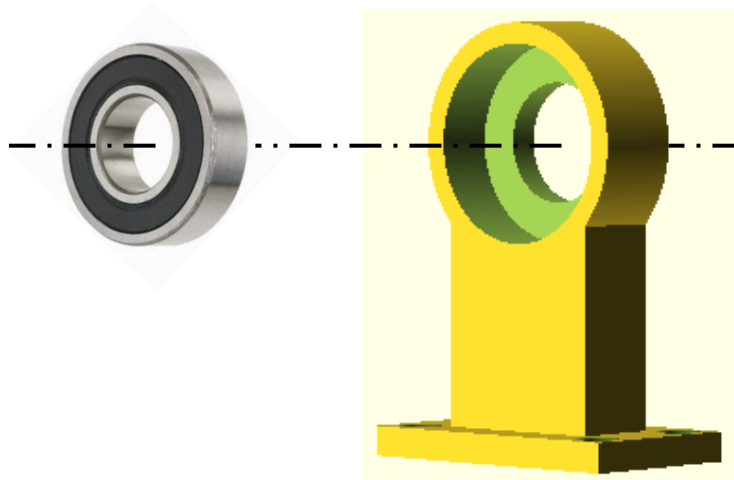


Figura 5.15 Esquema ensamblado del rodamiento.

Prototipo

5.6 Fotos

A continuación se muestran una serie de fotos que permite ver el aspecto general del prototipo y ciertos detalles comentados.

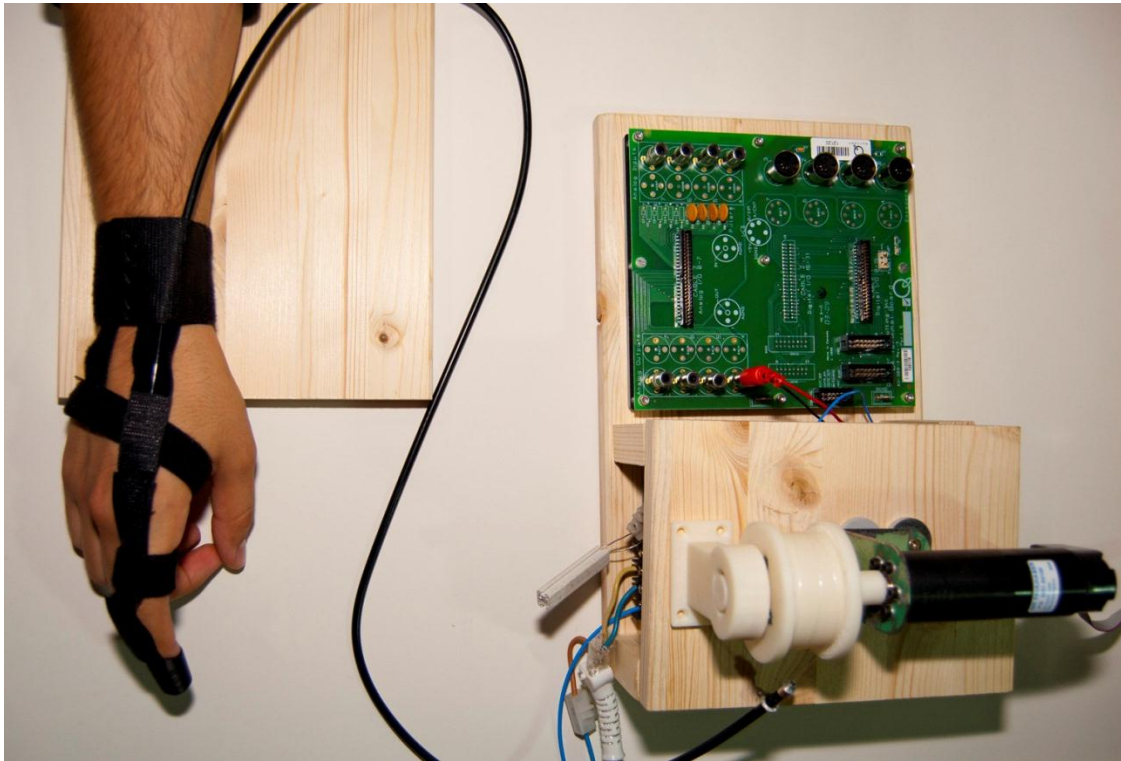


Figura 5.16 Sistema completo sin PC.

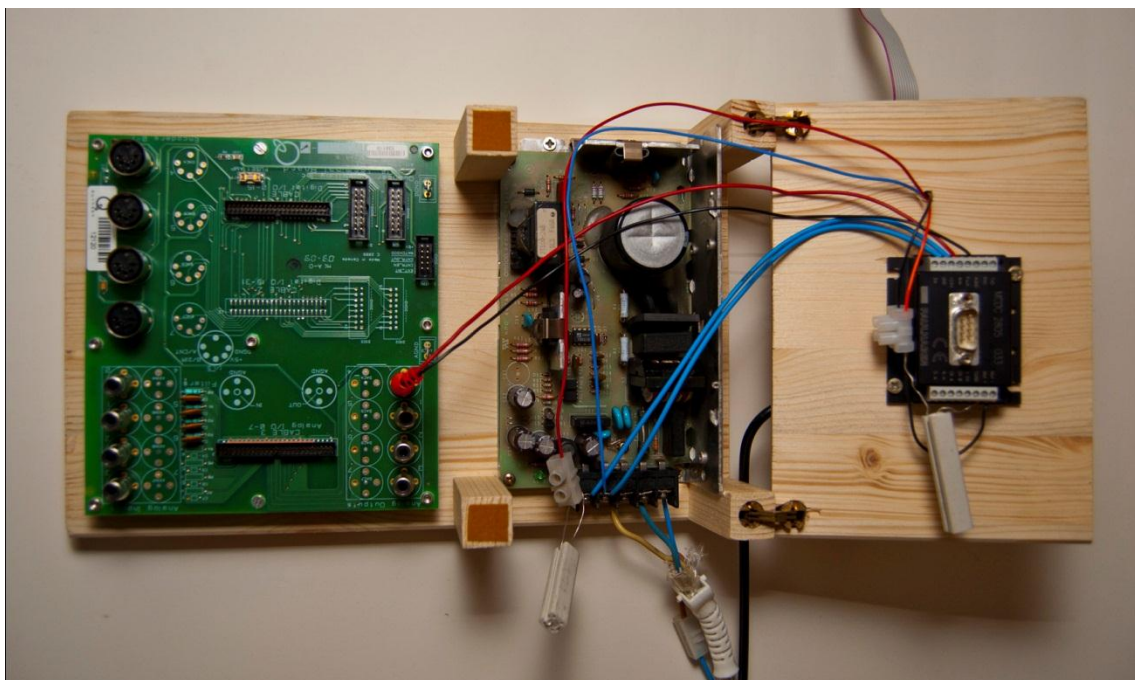


Figura 5.17 Base soporte con tapa abatida.

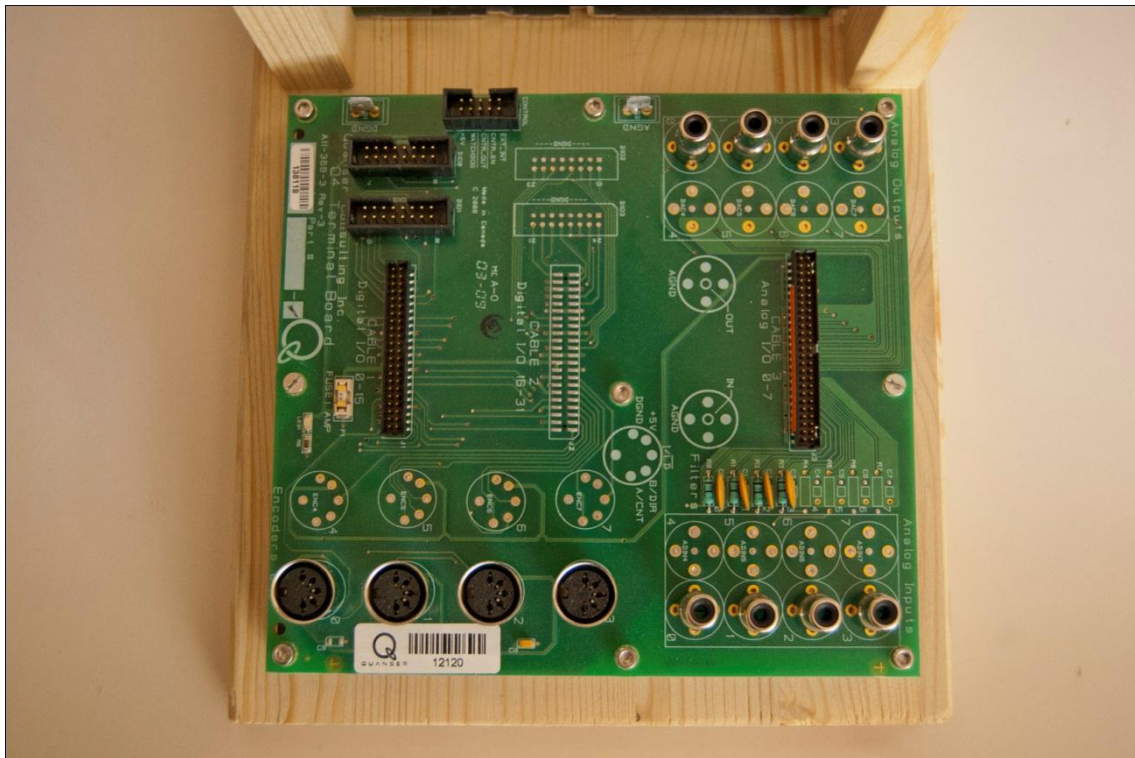


Figura 5.18 Placa de conexiones Q4 de Quanser.

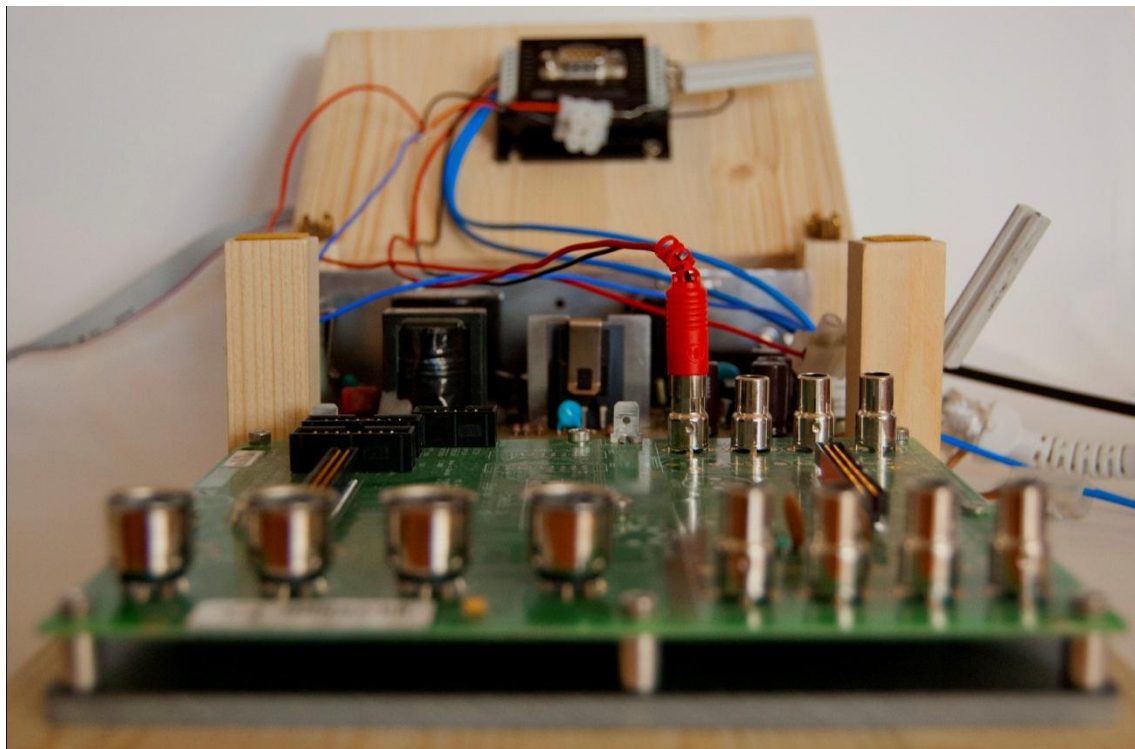


Figura 5.19 Alzado base soporte abierta.

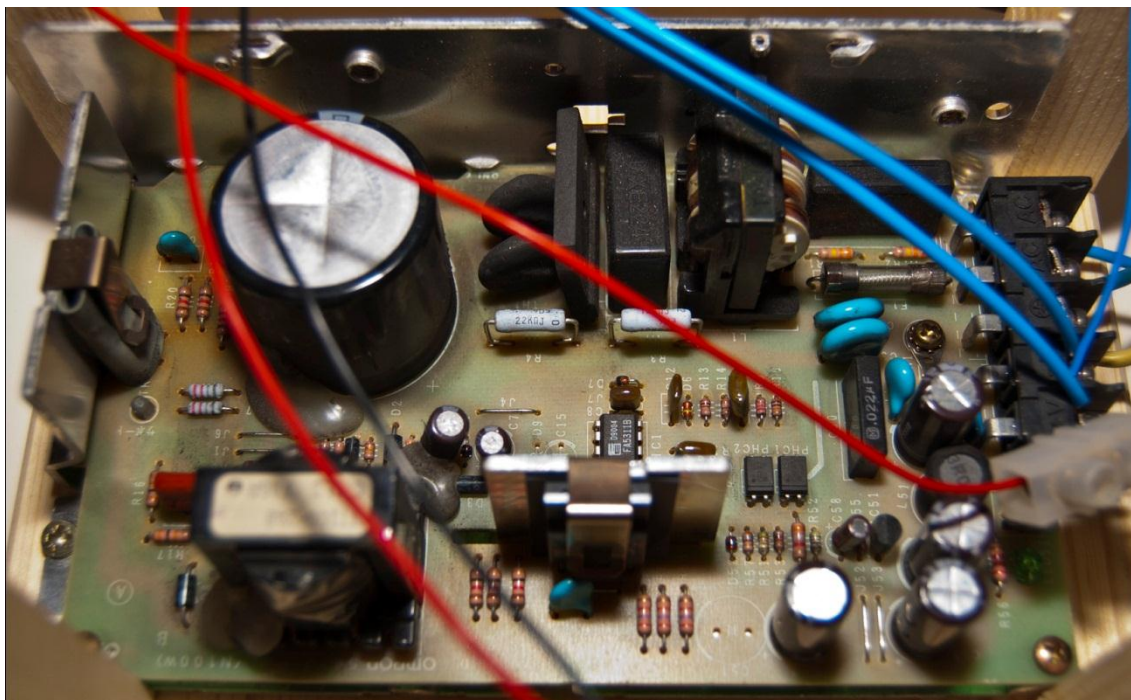


Figura 5.20 Fuente de alimentación s82J-10024 de OMRON.

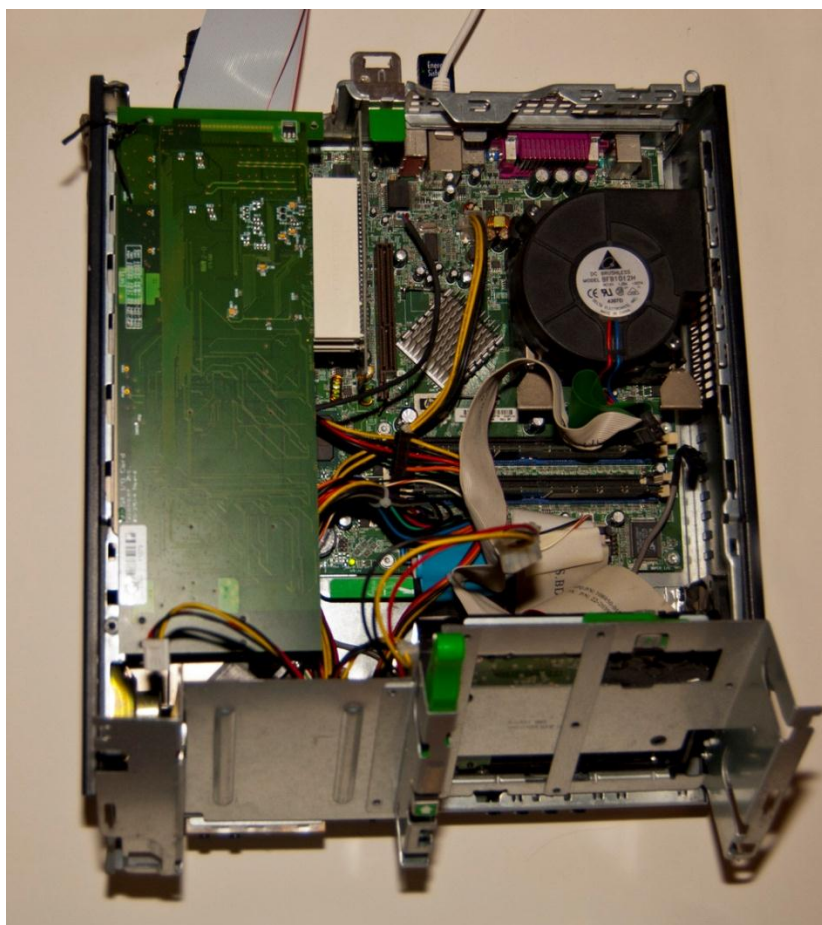


Figura 5.21 Tarjeta PCI Q4 de Quanser integrada en el PC

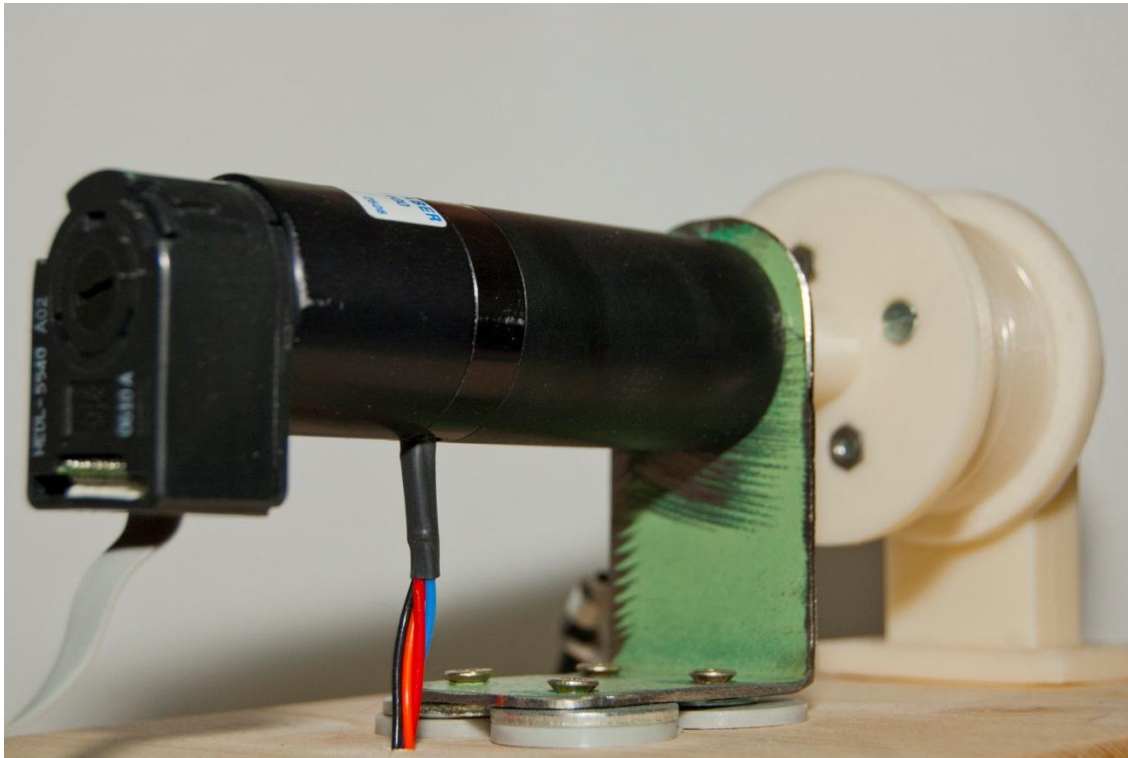


Figura 5.22 Sistema de anclaje del motor y acoplamiento del tambor.

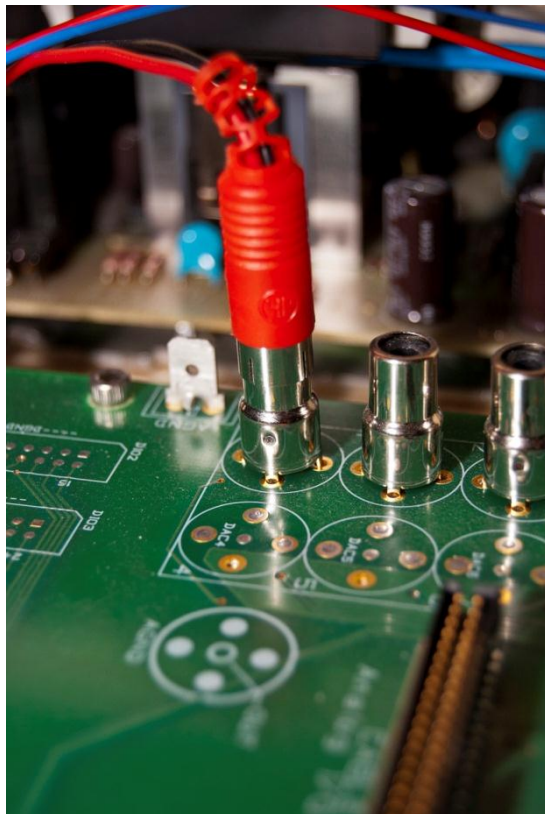


Figura 5.23 Conexión placa Q4 (izda.) y alzado tambor con soporte (dcha.).

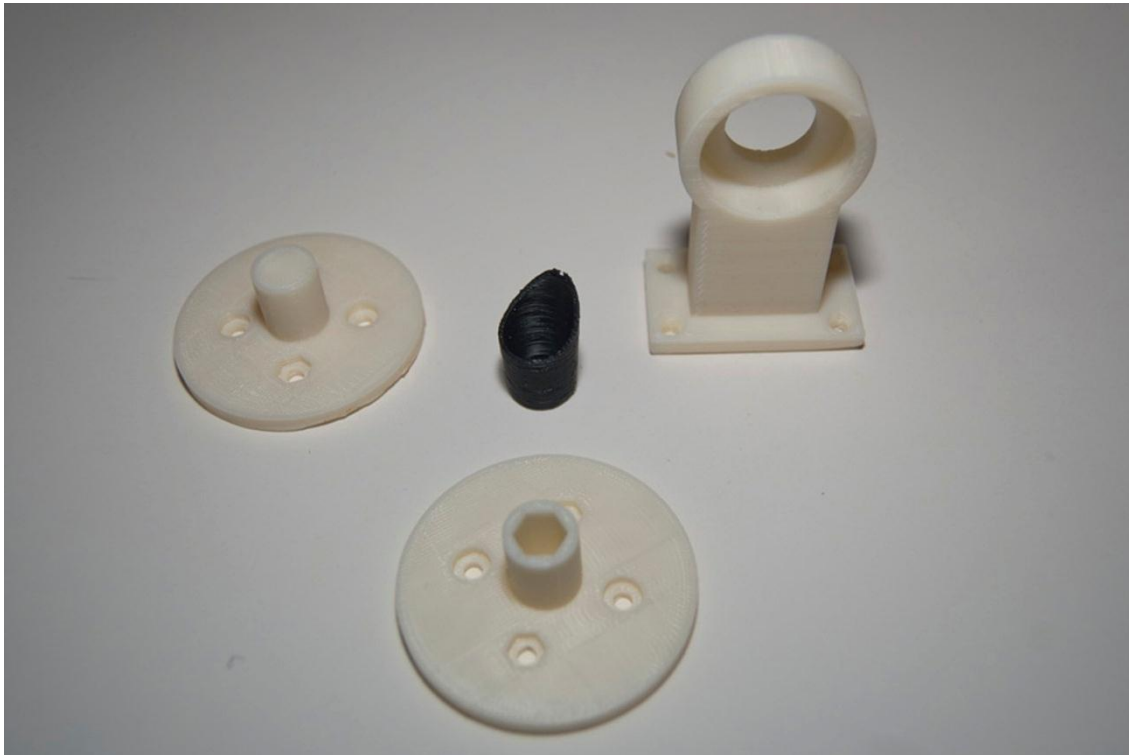


Figura 5.24 Juego de piezas fabricadas con la impresora 3D.



Figura 5.25 Base sujeción con cintas de velcro.



Figura 5.26 Detalle del guiado del hilo de sedal.



Figura 5.27 Parte del exoesqueleto correspondiente al dedo.



Figura 5.28 Exoesqueleto durante la flexión del dedo.



Figura 5.29 Exoesqueleto durante la extensión de los dedos.

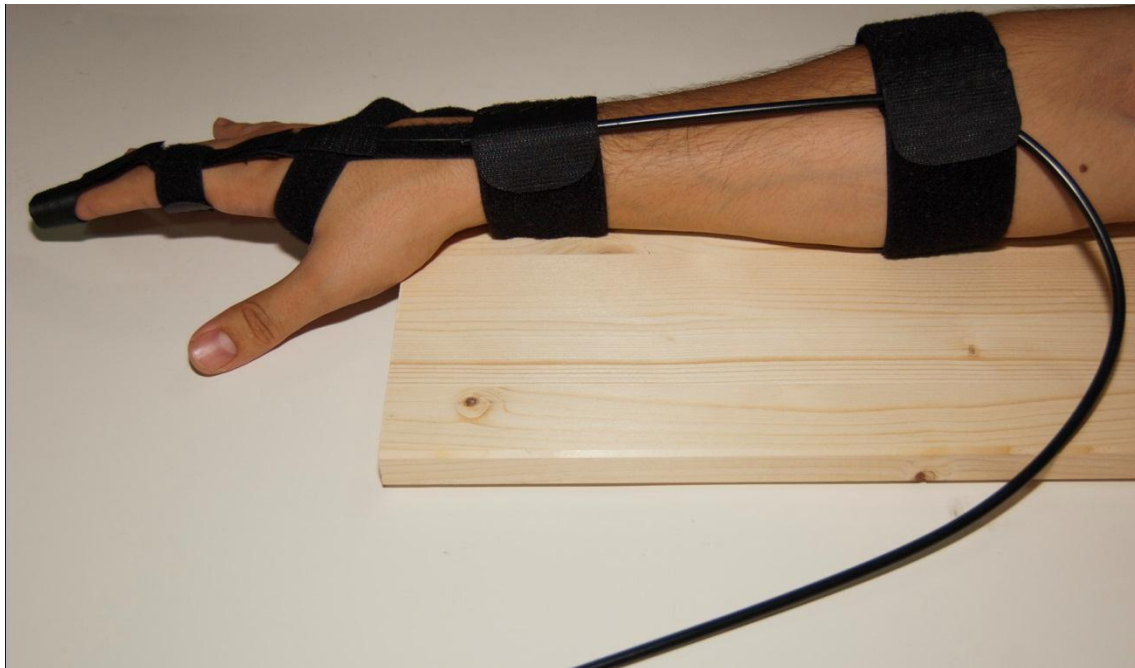


Figura 5.30 Perfil del exoesqueleto completo con tubo guía.

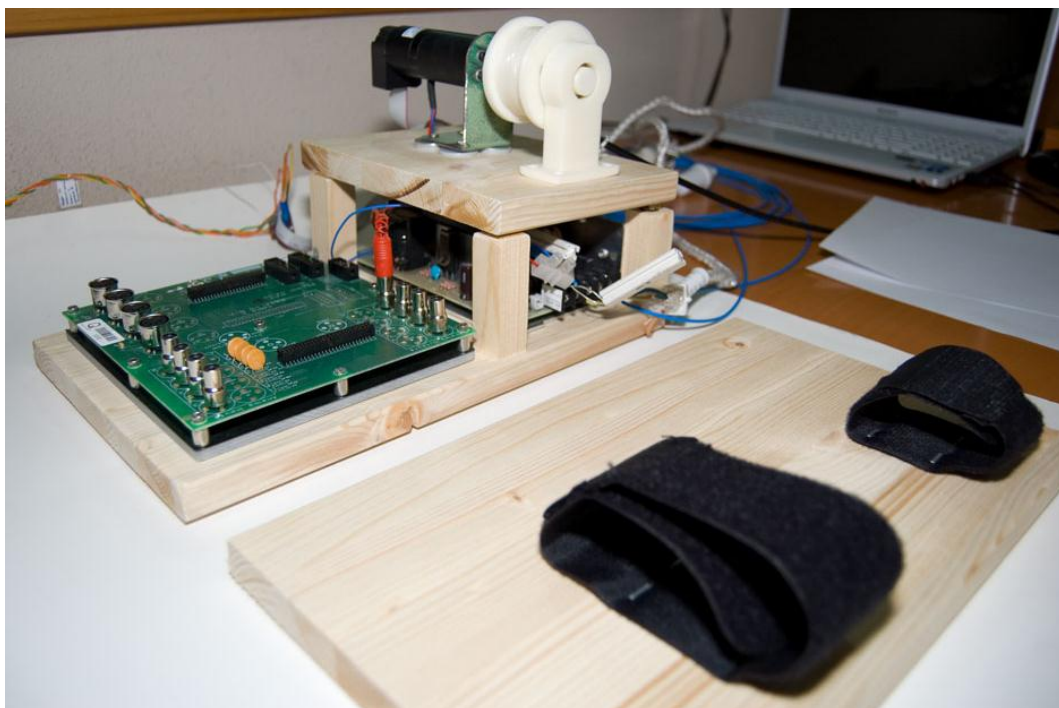


Figura 5.31 Panorámica del prototipo.

6 Presupuesto

El presupuesto incluye el diseño de un sistema de control de fuerza que ayudará a la rehabilitación de los dedos de la mano de los pacientes que hayan visto mermadas sus capacidades motoras. Dicho sistema de control será integrado para interactuar con el paciente mediante un exoesqueleto cuyo diseño y construcción también van incorporados en este presupuesto. Por último, se incluye de igual manera el diseño de un sistema de medida de fuerza sin utilización de sensores comerciales que incrementen el coste de forma sustancial.

La elaboración de este proyecto requiere la adquisición de ciertos dispositivos y materiales que suponen unos costes adicionales. Están distribuidos en varios cuadros resumen mostrados a continuación.

6.1 Materiales

COMPONENTE	DESCRIPCION	UDS	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL(€)
Base prototipo	Madera 20x80	1	6	6
Listón madera	Sección cuadrada 2cm	1	1,75	1,75
Bisagras	Tipo	2	2,25	4,5
Tornillería	Variada	1	1	1
Patas de goma	Tacos antideslizantes	1	0,6	0,6
Velcro	Variado (1m+1m)	1	9,5	9,5
Hilo resistente	Bobina	1	2,4	2,4
TOTAL				25,75

6.2 Hardware

COMPONENTE	DESCRIPCION	MARCA	UDS	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL(€)
Q4 HIL Board	Placa de desarrollo	Quanser	1	3695	3695
3257G024V	Motor DC	Faulhaber	1	243,36	243,36
MBZ22V	Freno motor	Faulhaber	1	400	400
HEDL5540A	Encoder	Faulhaber	1	54,92	54,92
MCDC2805	Driver	Faulhaber	1	205	205
S82J-10024	Fuente de alimentación	OMRON	1	64	64
SMD1,5A	Fusibles placa desarrollo		20	1,57	31,4
Resistencias	Potencia 2W		2	2	4
Round DIN	Conector encoder		1	2	2
RCA	Conector placa desarrollo		2	0,4	0,8
Cable	Cable de conexiones (1m)		2	1,5	3
TOTAL					4703,48

6.3 Software

COMPONENTE	DESCRIPCION	MARCA	UDS	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL(€)
QuaRC 2.1	Librerías de Quanser	Quanser	1	468	468
Matlab 7	Entorno de desarrollo	MathWorks	1	6000	6000
TOTAL					6468

6.4 Diseño y documentación

ACTIVIDAD	€/HORA	HORAS	PRECIO TOTAL(€)
Diseño	60	450	27000
Documentación	30	90	2700
TOTAL			29700

6.5 Costes totales

TIPO DE COSTE	COSTE
Hardware	4703,48
Software	6468
Coste materiales	25,75
Coste de personal	29700
Subtotal	40897,23
IVA (21%)	8588,4183
TOTAL	49.485,65 €

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de **49.485,65€.**

Leganés a 20 de Julio de 2012

El ingeniero proyectista

Fdo. Ignacio Santoja Guerrero

7 Conclusiones

7.1 Conclusiones

El objetivo de este proyecto es construir un prototipo útil para la rehabilitación de los dedos de la mano, y que tenga un coste reducido. Para este fin, se ha realizado un estudio de los diferentes modos de controlar el sistema para darle la funcionalidad requerida, y mediante una comparativa poder escoger entre las diferentes técnicas estudiadas la que se demuestre que sea más apropiada.

A continuación se hará un breve recorrido por todo el proyecto comparando y extrayendo conclusiones sobre cada una de las decisiones tomadas y los resultados obtenidos de las simulaciones y ensayos. Además, explicarán las posibles fuentes de error de ejecución y de diseño para dar una visión más global de las conclusiones de este proyecto.

En lo que a sistemas de control se refiere, se han estudiado diferentes tipos de controles todos ellos orientados a la implementación sólida de un control de fuerza para ser aplicado en el prototipo construido.

El primero de los diseños es el de medida de posición (Figura 4.6). En él, la principal y única fuente de error reside en la resolución del encoder, que como ya se comentó es de 500pulsos/rev. Aunque se haya configurado el sensor en modo x4, la resolución real no varía, ya que dicha configuración es de *software*, por lo que se obtiene una medida proveniente del encoder y multiplicada por 4, lo cual es favorecedor a la hora del tratamiento de la señal.

Del mismo modo se ha implementado el esquema correspondiente a la medida de velocidad (Figura 4.2), pero introduciendo en este caso una derivada temporal como se desprende de la ecuación $v = \frac{d\theta}{dt}$ ya vista anteriormente.

En el caso de la medida de posición, también se ha incorporado un bloque de valor medio que introduce pequeñas alteraciones respecto de la señal real. Estas alteraciones dependen de la frecuencia a la que se configure el bloque. Si dicha frecuencia fuera infinita, se trataría de una medida continua que no intervendría en los resultados.

A la hora de controlar ambas magnitudes, posición y velocidad (Figura 4.22 y Figura 4.9), se ha optado por el análisis de dos de los métodos más utilizados: reguladores PID o método clásico, y cancelaciones de pares polo-cero. Las conclusiones sobre ambas técnicas ya han sido comentadas en el capítulo correspondiente. El control por el método clásico involucra reguladores PID. La mayor de las complicaciones que presentan es su sintonización, ya que un buen control lleva consigo un amplio conocimiento sobre las características de cada tipo de sistema, así como de la influencia de cada uno de los tres parámetros que a priori tiene un regulador PID (constantes proporcional, integral y derivativa). La ventaja principal de este método reside en que cuando se tiene una experiencia amplia en sistemas de control, son fáciles y rápidos de sintonizar, a la vez que evitan infinidad de problemas en los esquemas debido a su simplicidad.

Por otro lado, el método de las cancelaciones de pares polo-cero, tiene la ventaja de que es más intuitivo visualmente que el método clásico. Es así porque teniendo presente el diagrama de bode de un sistema de primer orden, es fácilmente detectable el polo, y siendo de orden mayor, también se detecta el polo dominante, que es el que más afecta al sistema. Este método se centra en esta circunstancia, ya que anulando el efecto de dicho polo, el polo del regulador que se implementa se convierte en dominante, determinando la dinámica del sistema según se encuentre más próximo o lejano al origen. Por este motivo, se tiene que de los tres parámetros a determinar mediante esta técnica, la posición del cero está fijada por el polo dominante de la planta, quedando sólo dos parámetros por configurar. El polo debe satisfacer las especificaciones de rapidez, mientras que la constante proporcional debe ser suficientemente alta para alcanzar el valor de referencia, pero suficientemente lenta para no alterar la dinámica conseguida con la colocación estratégica del polo del regulador.

Otro aspecto a resaltar es la obtención de las funciones de transferencia tanto teóricamente como por métodos gráficos. En el caso teórico, se debe tener en cuenta que los datos proporcionados por el fabricante de cada dispositivo (motor, encoder, driver, etc.), son datos típicos medios, por lo que se introduce un error difícil de detectar pero que puede acarrear una falta de rigor en los resultados. En cuanto al método gráfico, la fuente de error es doble. Por un lado, se monitoriza la respuesta real del sistema ante entrada escalón unitario, para asemejarlo a un sistema de primer orden, cuando el orden probablemente es mayor. Por el otro lado, la forma gráfica de conseguir la función de transferencia es manual, por lo que las medidas no son exactas y pueden variar según la persona que las realice o el instante en el que se tome la respuesta del sistema.

En cualquier caso, mediante múltiples ensayos con funciones teóricas, reales y halladas experimentalmente, se concluye que las f.d.t. obtenidas se ajustan de modo muy satisfactorio.

En todos los controles estudiados hay una característica común en la dinámica. Como ya se ha explicado durante este documento, es importante atender a la utilidad que se le dará a estos controles, y es que serán adaptados para su uso con humanos. Por ello se debe prestar

Conclusiones

especial atención a las aceleraciones y sobreoscilaciones de la respuesta al ser controlada. Al ser el dedo de un paciente sobre el que se ejerza la fuerza, la aceleración debe ser baja para evitar lesiones. Lo mismo ocurre con las sobreoscilaciones. Se pretende que la respuesta del sistema sea lo más estable posible por lo que de no ser así, las medidas podrían ser erróneas.

Ahondando en el control realmente buscado, el de fuerza, se basa en quizás la parte más compleja del proyecto: la medida de corriente.

La manera elegida para la medida de fuerza ejercida por el motor es a través de la corriente consumida por el motor. Como ya se ha explicado en varias ocasiones, se pretende medir dicha magnitud eludiendo el uso de un sensor para tal fin, que son considerablemente costosos, encareciendo el prototipo, lo cual se quiere evitar.

El esquema diseñado para tal medida es el mostrado en la Figura 4.38, en el que se obtiene la corriente consumida, y posteriormente se extraen otras magnitudes importantes como la fuerza y el par desarrollado por el motor de corriente continua utilizado.

El principal problema que influye en todo el sistema es el ruido introducido a la placa de desarrollo como consecuencia de la señal diferencial de potencial medida en la resistencia de sensado (1Ω) colocada a la entrada del motor. Como consecuencia, se ha hecho necesario la inserción de un filtro paso bajo para eliminar el citado ruido y poder visualizar la medida real de tensión. El problema está en que el filtro (por *software*) altera la dinámica de la respuesta, y por ello ha de ser considerada a la hora de hallar funciones de transferencia o localizar la situación del cero del regulador en el caso de optar por la cancelación de pares.

Cuando se ha tratado la señal para obtener una onda legible, existen más fuentes de error, como son la tolerancia de la resistencia, y la más importante, la corriente de vacío, que ha sido calculada teóricamente en el Anexo A3 con la correspondiente desviación por el uso de los datos de las hojas de características de cada dispositivo.

Una vez explicadas las fuentes principales de error, se procede a la comparativa entre los cuatro métodos de control utilizados en el caso del control de fuerza (método clásico, método de las cancelaciones, lógica difusa e integración con el control de posición).

Las ventajas e inconvenientes de los dos primeros métodos son idénticas a lo comentado respecto de los controles de posición y velocidad. La única variación reside en el bloque del sensor y posterior tratamiento para llegar a la magnitud deseada. Sin embargo, la respuesta tiene una inercia que lo hace más complicado de controlar.

El control ejercido por el método de la lógica difusa es un control efectivo, aunque complicado de implementar. De hecho el tamaño del esquema (Figura 4.55) es mucho mayor que cualquiera de los otros. A favor se tiene que es posible controlar más parámetros influyentes como la diferencia de fricción entre los dos sentidos de giro del eje del motor.

Por último, como ya ha sido comentado, el método de integración de controles de posición y fuerza ha resultado fallido debido a la imposibilidad de controlar dos magnitudes con un único parámetro de actuación (tensión de entrada al motor).

Teniendo presente lo explicado de cada una de las técnicas, se concluye que exceptuando el de integración, los 3 restantes son igualmente válidos y que cada uno tiene diferentes ventajas e inconvenientes. El método clásico es simple aunque poco intuitivo. El método de las cancelaciones es intuitivo y peligroso en la realidad, ya que la cancelación no es perfecta en la realidad, lo que puede provocar inestabilidad en el sistema. Y la lógica difusa permite una flexibilidad que no dan los otros métodos. A cambio, es más complicado de implementar debido al gran número de líneas y señales requeridas.

Por todo ello, cualquiera de los métodos es válido para la aplicación de este proyecto.

En el aspecto de la construcción del prototipo, la principal y muy importante fuente de error es la ejecución y el ensamblado de las piezas. Desde el primer momento se optó por un enfoque de sistemas de control y no tanto de mecánica y fabricación, por lo que se ha buscado construir un prototipo funcional olvidando el acabado y la estética.

Bajo esta circunstancia, el prototipo puede ser mejorado en el aspecto mecánico. Un problema importante es que el control y sistema de medida de fuerza mide la magnitud en el motor, por lo que las fricciones añadidas por los materiales de la maqueta introducen un error en la medida. El sistema evalúa la fuerza desarrollada por el motor, pero no discrimina si la resistencia proviene del paciente o del rozamiento.

Para terminar, se puede concluir que este proyecto ha obtenido resultados satisfactorios ya que se ha conseguido controlar una magnitud complicada como la fuerza sin recurrir a un sensor específico para este fin. Además el exoesqueleto, aunque todavía no es una versión muy elaborada y no es apto para su comercialización, abre la posibilidad de un nuevo modelo flexible, adaptable, y fácil de colocar. Esto convierte a este prototipo en el inicio de un posible futuro producto terminado que ayude a todas esas personas que requieren rehabilitación y por temas económicos no ven accesible un sistema de este tipo.

7.2 Trabajos futuros

La realización de este proyecto ha sido larga y laboriosa, y por ello, a medida que se desarrollaba, han surgido nuevas ideas y opciones aplicables que mejorarían el prototipo y los controles, e incluso que incorporarían nuevas características al proyecto.

A continuación se van a explicar de manera breve algunas nuevas líneas de investigación posibles para un futuro más o menos cercano. Algunas de ellas se han iniciado pero debido al tiempo disponible se ha optado por relegarlas a un segundo plano.

7.2.1 Ampliación del proyecto

El primero de los trabajos futuros posibles es la mejora del sistema en cuanto a grados de libertad se refiere. En este caso, se ha tenido en cuenta un único grado de libertad, ya que las

Conclusiones

falanges distal, media y proximal tienen sus movimientos acoplados. No así el movimiento de éstas con el metacarpo, por lo que éste es un punto claro de mejora para el futuro.

Por otro lado, se ha construido un prototipo para un único dedo, por lo que un futuro trabajo casi inmediato sería la extensión del prototipo al resto de los dedos de la mano, teniendo especial cuidado con las interacciones entre dedos que puedan surgir. La diferencia principal estará en la orientación del correspondiente al dedo pulgar. Todo ello llevaría asociado un incremento de coste puesto que se multiplican los dispositivos utilizados.

Si se construyera un prototipo para rehabilitar todos los dedos de la mano, sería necesario implementar un modo de actuación que evitara lesiones causadas por movimientos de diferentes dedos que puedan ser incompatibles.

7.2.2 Parametrización del exoesqueleto

Quizá se trata del trabajo futuro más ambicioso de cuantos se proponen. Al inicio de este proyecto, se ideó un posible sistema en el que fuera posible construir un exoesqueleto personalizado para cada usuario, partiendo de una simple foto de su mano.

Esta foto se trata con diferentes filtros y técnicas de percepción para llegar a extraer unas medidas características de cada mano con las que, siendo introducidas en un programa para tal uso, se generaran los archivos pertinentes y necesarios para la impresión en 3D de las diferentes partes del exoesqueleto.

Como ya se ha mencionado, esta posibilidad de mejora tiene detrás un gran trabajo de digitalización y tratamiento de imágenes, que hace de ella un proyecto paralelo en sí mismo.

7.2.3 Repetición de trayectorias

Es la que mayor tiempo ha absorbido pero que finalmente no se acabó por falta de tiempo.

La idea principal es captar las trayectorias seguidas por la punta del dedo dañado. Cuando esto es posible, se dibuja una trayectoria determinada para ser visualizada en un monitor y el paciente deberá seguirla, en la medida de lo posible. A partir de ahí se realiza un análisis estadístico que permita cuantificar la mejora del paciente, y saber si la lesión remite o no.

Para esta mejora del proyecto, se utilizará un sistema comercial llamado Wiimote® (mando de la consola Nintendo Wii®). Este artilugio incorpora sensores de inclinación en los tres ejes de coordenadas cartesianas (Figura 7.1), además de un sistema de posicionamiento mediante infrarrojos proveniente de una serie de diodos led externos a este dispositivo. El funcionamiento es simple, los diodos emiten luz en el espectro infrarrojo, y el receptor del Wiimote los recibe y se posiciona según la luz detectada. Esto abre un abanico de posibilidades. Se decide entonces alterar ligeramente dicho funcionamiento.

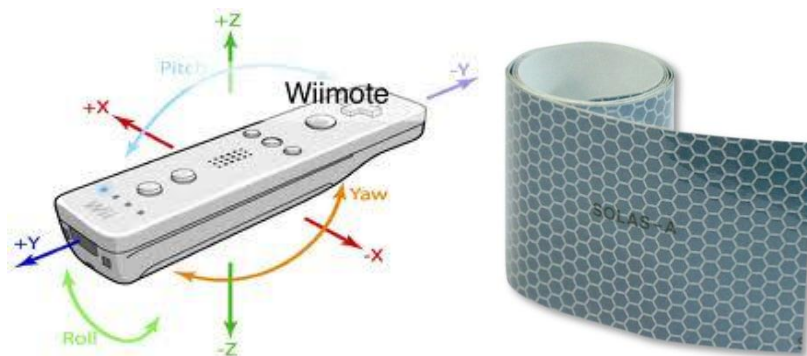


Figura 7.1 Posicionamiento espacial del Wiimote y cinta reflectante.

Cualquier superficie es capaz de reflejar los rayos infrarrojos, pero con distinta intensidad. Por este motivo, se idea cubrir la yema del dedo del paciente con un adhesivo reflectante especial (Figura 7.1). Con esto, las posiciones de los diodos y el Wiimote varían. El mando apunta al dedo, exactamente en la misma dirección y sentido que los diodos led. Así, la luz infrarroja emitirá hacia la yema del dedo recubierta de adhesivo reflectante, donde se verá reflejada en sentido contrario para ser detectada por el sensor del mando Wiimote [17]. De esta forma tan simple se ha conseguido que el movimiento del dedo sea detectado sin ser preciso incorporar ningún dispositivo en el propio dedo (Figura 7.2).



Figura 7.2 Wiimote y diodos led en la misma dirección y sentido.

Otra fuente de problemas es la conexión del Wiimote a un ordenador cualquiera. Se conectan mediante bluetooth, por lo que se debe disponer de receptor, y además compatibles entre sí, ya que multitud de receptores no detectan ciertos dispositivos por cuestión de la versión de los programas utilizados o del sistema operativo.

Los programas necesarios son el Bluesoleil para establecer la conexión PC-Wiimote, y el Wii Sensor, que monitoriza las señales de los sensores del mando (Figura 7.3).

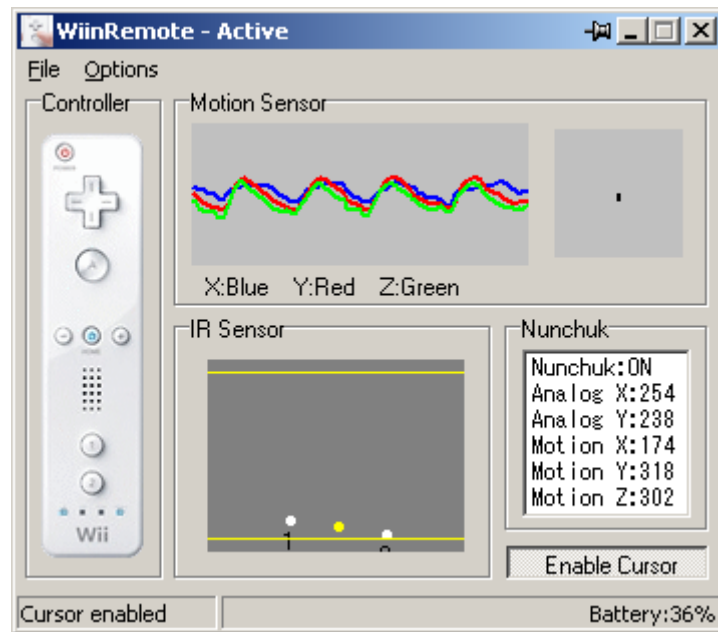


Figura 7.3 Apariencia programa Wii Sensor.

Una vez realizada la conexión, todo está preparado para interactuar con los sensores del dispositivo. Sólo es necesario crear en Simulink un esquema que permite una determinada funcionalidad del Wiimote. Para ello, la librería de QuaRC incluye bloques para esta finalidad.

El esquema que se ha implementado es muy simple (Figura 7.4). El bloque de Wiimote proporciona las salidas de los sensores según las coordenadas cartesianas x e y, los acelerómetros, los botones y señal de IR válido.

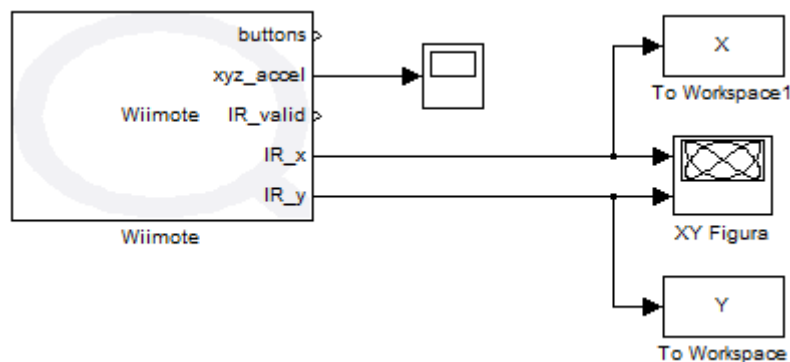


Figura 7.4 Esquema para monitorizar la salida de los sensores.

A la vista del esquema de la Figura 7.4, se observa como se extraen las señales de posicionamiento mediante infrarrojos en los ejes x e y, se monitorizan, y se guardan como vectores en el Workspace de Matlab. Una vez allí, ambos vectores serán tratados como un gráfico de puntos que proporcionará la trayectoria seguida por el dedo del paciente.

Por supuesto sería un requisito casi imprescindible la programación de una interfaz gráfica para el sistema, donde manipularlo sea sencillo y accesible a cualquier persona.

Una vez llegado a este punto, sólo quedaría cotejar los resultados con una trayectoria que habría sido dibujada previamente, haciendo un análisis estadístico lo más exhaustivo posible que proporcione datos cuantitativos de la evolución de la lesión del paciente.

Esta línea de investigación, como se desprende de la explicación anterior, ya ha sido abordada con resultados muy halagüeños, pero por escasez de tiempo ha tenido que ser pospuesta.

7.2.4 Aplicación a la realidad virtual

Una de las aplicaciones más innovadoras y ambiciosas en las que este proyecto podría encajar a la perfección, es la simulación de contacto real en programas de realidad virtual, es decir, que una persona sienta el contacto con algo virtual que obviamente no existe.

Un prototipo de las características del construido, engloba todo lo necesario para poder darle uso en el ámbito virtual. Los controles diseñados deberían cambiar sus especificaciones, no tener sobreoscilaciones y controlar la fuerza de un modo más exacto e inmediato.

Obviamente no sería un trabajo trivial partiendo de este proyecto, pero la aplicación no dista en exceso de la aquí propuesta.

Bibliografía

- [1] P. Tariq Rahman, W. Sample, M. Shanmuga Jayakumar, M. M. King y J. Y. Wee, «Passive exoskeletons for assisting limb movement,» *Journal of Rehabilitation Research & Development*, p. 7, 2006.
- [2] E. L. J. García, «Trauma Zaragoza,» [En línea]. Available: <http://www.traumazaragoza.com/traumazaragoza.com/Inicio.html>.
- [3] B. S. Godfrey, J. H. Rahsaan, P. S. y C. N. Schabowsky, «Development and pilot testing of HEXORR: Hand EXOskeleton Rehabilitation Robot,» *Journal of Neuroengineering and rehabilitation*, 2010.
- [4] A. Wege, K. Kondak y G. Hommel, «Mechanical design and motion control of a hand exoskeleton for rehabilitation,» de *Mechatronics and Automation, IEEE International Conference*, 2005.
- [5] M. Mulas, M. Folgheraiter y G. Gini, «An EMG-controlled exoskeleton for hand rehabilitation,» de *Rehabilitation Robotics, ICORR 9th International Conference on*, 2005.
- [6] HongKongPolyU, «Exoskeleton Hand Robotic Training Device,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=iGadOXHO624>.
- [7] Rice Institute of Biosciences and Bioengineering, «Institute of Biosciences and Bioengineering of Rice University,» [En línea]. Available: <http://ibb.rice.edu/Content.aspx?id=1055>.
- [8] E. Burdet, «International Neurorehabilitation Symposium,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.inrs2009.com/index.php?id=23>.
- [9] H. A. M. Díaz, «Capítulo I : SISTEMAS DE CONTROL,» de *Automatización Medioambiental*,

Lima, 2003, pp. 1-30.

- [10] J. Yang, Y. Hu, W. Huang, J. Chu y J. Gao, «Direct torque control of Brushless DC motor without flux linkage observation,» de *Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC IEEE*, 2009.
- [11] M. Cutkosky, «Haptics Pictures,» 2008. [En línea]. Available: <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Haptics/HapticsPictures.html>. [Último acceso: 11 08 2011].
- [12] R. Canton, «CyberGrasp,» *Estética ,Ciencia y Tecnología, creaciones electrónicas y numéricas*, 2005.
- [13] W. B. Griffin, W. R. Provancher y M. R. Cutkosky, «Feedback Strategies for Telemanipulation with Shared Control of Object Handling Forces,» *MIT Press Journals*, 2006.
- [14] C. Balaguer, S. Garrido y L. Moreno, *Ingeniería de Control. Modelado y control de sistemas dinámicos*, Ariel, 2004.
- [15] E. A. Rey, «Sistemas lineales y teoría de control. Análisis del lugar de las raíces. Universidad Autónoma de Madrid,» [En línea]. Available: <http://memnon.ii.uam.es/~eloy/media/TC/Tema05-AnalisisLugarRaices.pdf>.
- [16] V. M. A. Ruíz, «Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores,» *Escuela de Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica*, 2002.
- [17] J. C. Lee, «Gizmodo Digital Lifestyle,» 2008. [En línea]. Available: http://www.gizmodo.es/2008/01/22/guantes_hack_wiimote_interface_minority_report.html.
- [18] Quanser, «QuaRC_Installation_Guide».

Anexos

A1 Instalación QuaRC

En este anexo se pretende guiar al lector durante la instalación del entorno de desarrollo para evitar problemas de compatibilidad de versiones u opciones de instalación.

QuaRC se integra en Simulink para permitir la ejecución en tiempo real de los modelos de Simulink en diferentes sistemas operativos como Windows o QNX x86. Los componentes requeridos son los siguientes:

- **QuaRC Simulink Development Environment (SDE):** genera y compila el código procedente de Matlab y de los modelos de Simulink.
- **Quanser license Manager:** gestiona las licencias de los productos de Quanser.
- **Componentes Beta de QuaRC Simulink:** incluye bloques adicionales a las librerías de Simulink. Nótese que por defecto, este componente no se instala. Ha de seleccionarse manualmente en la ventana *Feature Selection* durante el proceso de instalación.

A1.1 Requerimientos de software

1. QuaRC SDE (Simulink Development Environment)

- MATLAB R2007a, R2007b, o R2008a.
- Simulink acompañando a MATLAB R2007a, R2007b, o R2008a.
- RTW (Real-Time Workshop) acompañando a MATLAB R2007a, R2007b, o R2008a.
- Opcional: Control System Toolbox acompañando a MATLAB R2007a, R2007b, o R2008a.

Existen requerimientos adicionales que dependen del sistema operativo usado para compilar:

- **QuaRC Target para Windows** requiere Microsoft Visual Studio 2005 Professional SP1. Nótese que RTW R2008a no soporta Microsoft Visual Studio 2008.
- **QuaRC Target for QNX x86** requiere Momentics X86 Cross Hosted Development Tools para Windows Host Environment 6.3.0 SP2.

2. QuaRC Targets

En función de donde se vaya a ejecutar el código también existen otros requerimientos:

- **QuaRC Target para Windows** requiere Microsoft Windows XP Professional (SP2 and SP3).
- **QuaRC Target para QNX x86** requiere QNX Neutrino 6.3.0

3. Quanser License Manager




































































- Microsoft Windows XP Professional (SP2 and SP3) o Microsoft Windows Vista

A1.2 Requerimientos de hardware

1. QuaRC SDE (Simulink Development Environment)

- Procesador: 2.8 GHz velocidad de reloj en un Intel Pentium IV o AMD (o mayor).
- RAM: 512 MB (1024 Recomendado)
- Espacio en disco: 130 MB

A continuación se muestra una tabla resumen (Figura) de las compatibilidades de QuaRC, Windows y Matlab. Esta tabla se puede encontrar en [18].

		HOST COMPUTER									
		Host Operating System*	Windows OS Service Pack (SP)	Compiler Tools	MATLAB, Simulink, RTW, Control System Toolbox (for labs)						
TARGET TYPES	WINDOWS***		SP2 or SP3	MS VS**, or C++ Prof. or Express Ed. SP1	R2007a	R2007b	R2008a	R2008b	R2009a	R2009b	R2010a
				2005 [8.0]							
				2008 [9.0]	N/A	N/A	N/A				
			No SP or SP1	2005 [8.0]							
				2008 [9.0]	N/A	N/A	N/A				
			No SP	2008 [9.0]	N/A	N/A	N/A	N/A			
	QNX X86***		SP2 or SP3	QNX Momentics x86***							
											
					No SP or SP1						
			No SP				N/A	N/A	N/A	N/A	
LINUX ARM (GUMSTIX)***			SP2 or SP3	No compiler tools required							
											
					No SP or SP1						
		No SP	N/A		N/A	N/A	N/A				

0410-2.1

Figura A.1 Cuadro resumen compatibilidad.

Conclusiones

2. QuaRC Targets

Windows Target

- Procesador: 300 MHz de velocidad de reloj en un Intel Pentium o AMD (o mayor).
- RAM: 256 MB
- Espacio en disco: 10 MB

QNX x86 Target

- Procesador: 300 MHz de velocidad de reloj en un x86 o AMD (o mayor).
- RAM: 128 MB
- Espacio en disco: 5 MB

3. Quanser License Manager

- Procesador: 300 MHz de velocidad de reloj en un x86 o AMD (o mayor).
- RAM: 128 MB
- Espacio en disco: 7 MB

En caso de actualización de la versión de QuaRC, pueden aparecer enlaces rotos en algún bloque. En este caso, en el menú “QuaRC / Upgrade blocks” se pueden reparar y actualizar a la versión más reciente.

A1.3 Instalación

Para una correcta instalación del programa es necesario hacerlo con privilegios de administrador.

Si ya se dispone de una versión anterior deberá ser desinstalada previamente.

Lo más aconsejable es instalar la versión apropiada de Matlab antes que la del QuaRC, ya que de esta forma, se asociarán las librerías automáticamente. Si no es así, es posible asociarlas posteriormente, pero hay que hacerlo manualmente.

Los pasos a seguir tras la instalación de Matlab son los siguientes:

1. Insertar el CD de instalación de QuaRC.
2. Ejecutar el archivo “setup.exe”.
3. Pulsar “Next” en la ventana de bienvenida.
4. Marcar la opción “I agree” y “Next” (Figura).

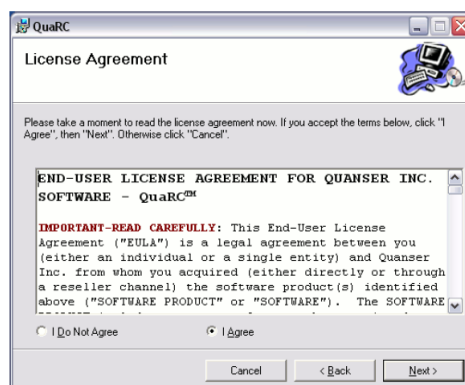


Figura A.2 Pantalla de instalación.

5. Asegurarse de que en la ventana “Feature selection” están marcadas las dos opciones posibles de QuaRC y QuaRC License Manager.

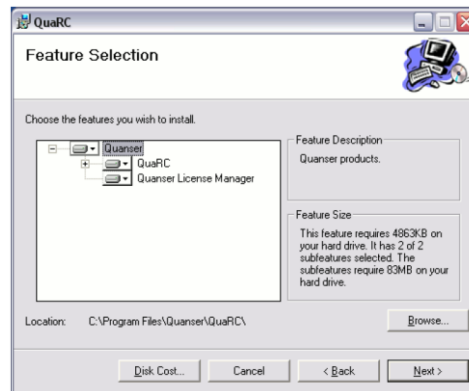


Figura A.3 Pantalla de instalación *Feature Selection*.

6. Pulsar “Next” y “Finish”.
7. Pulsar “Run the Configure Licensing tool now” y selecciona la ruta donde se encuentra el archivo de licencia y pulsar “Finish”.
8. En la ventana de comandos de Matlab, escribir “mex-setup” y seguir las instrucciones para seleccionar Microsoft Visual Studio 2005 o algún otro compilador compatible.

Una vez instaladas todas las herramientas necesarias, en las librerías de Simulink aparecerá la nueva librería de QuaRC (Figura).

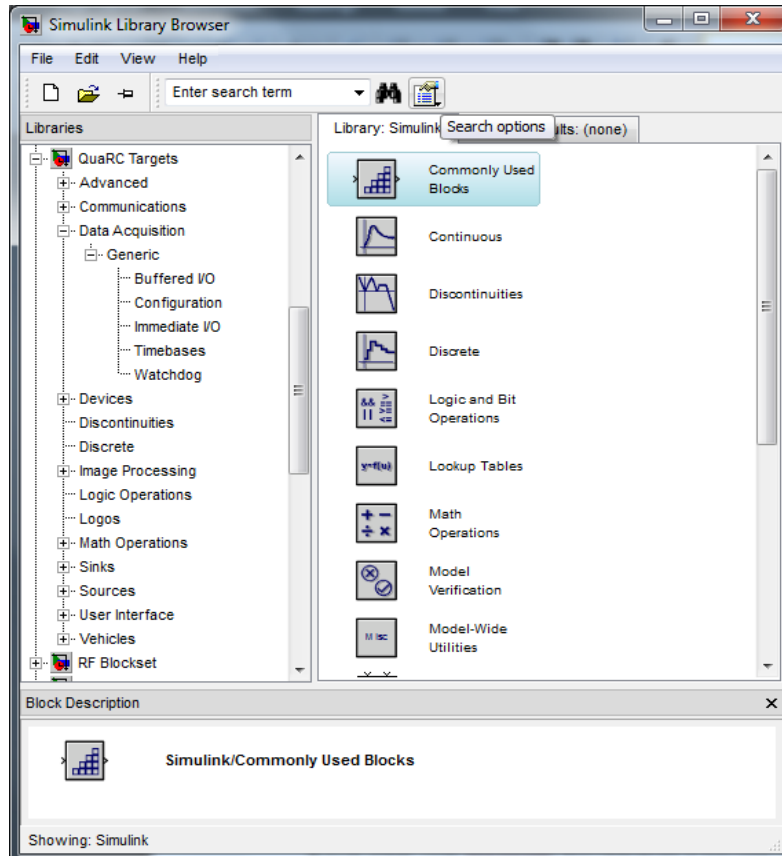


Figura A.4 Librería QuaRC de Simulink.

Conclusiones

A2 Impresora 3D

Este tipo de impresora es muy reciente. Permite la construcción, de una manera bastante precisa, de piezas que de otra forma serían muy difíciles y costosas de fabricar.

Lógicamente, para fabricar la pieza es necesario programar el diseño de un pequeño código que genera la geometría deseada. Para ello hay que ejecutar una serie de pasos previos a la impresión. Son el diseño, programación, generar archivo *.stl, seleccionar parámetros de impresión, generar archivo *.gcode, e imprimir.

A2.1 OpenScad

Una vez diseñada o ideada la pieza a construir, se procede a la programación del código. Se puede implementar varios programas aptos para este fin. Entre ellos, nosotros usaremos OpenScad. El motivo es que es un software de libre distribución y que usa un sencillo e intuitivo de aprender. Las piezas que se pueden generar son combinaciones de piezas más simples, como pueden ser cilindros, cubos, conos, etc. pudiendo ser estos desplazados, unidos o restados.

Otros programas existentes en el mercado ofrecen una gama más completa, pero para piezas de un nivel de complejidad bajo como éstas es suficiente.

Las funciones utilizadas son las siguientes:

CUBE ([x,y,z]): con esta herramienta básica podremos hacer prismas rectangulares. Para obtener un cubo, ya que los tres parámetros son iguales ($x=y=z$) bastaría con poner `cube(size=3)` o `cube(3)`.

CYLINDER (r=x, h=z): gracias a los parámetros ya indicados en el apartado anterior, esta figura no sólo nos permitirá generar cilindros, sino toda clase de prismas. Para ello sólo tendremos que añadir la sentencia “\$fn=nº caras”. Este parámetro nos permite, sólo en cilindros, dar mayor o menor definición, en función del número de lados elegido. Expresado de otra forma, los cilindros son tratados como prismas rectos de un número “n” de caras.

```
//Cono
cylinder(r1=4, r2=0, h=7, $fn=50);

//Cilindro
translate([10,0,0])
cylinder (r=2, h=8, $fn=50);

//Prisma hexagonal
translate([-10,0,0])
cylinder (r=3.5, h=6, $fn=6);

//Cono truncado
translate([0,-10,0])
cylinder (r1=4, r2=2, h=8, $fn=50);

//Pirámide octogonal truncada
translate([0,10,0])
cylinder (r1=4, r2=2, h=3, $fn=8);
```

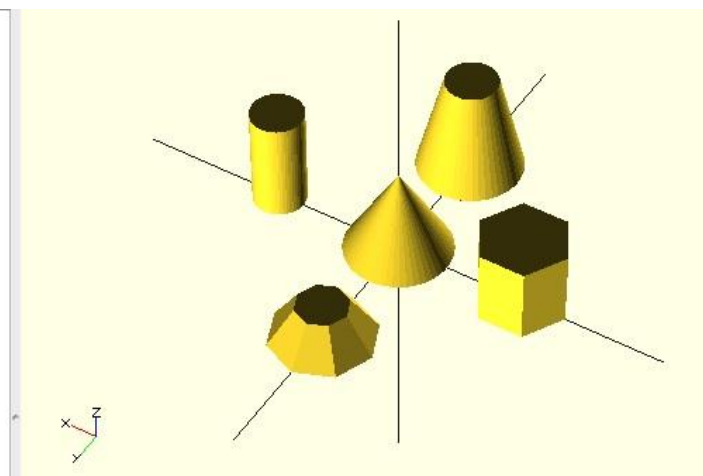


Figura A.5 Formas geométricas planas sencillas.

Además si queremos obtener un cono, o una pirámide podemos añadir un segundo radio $r2=0$. Con esto la figura quedaría cerrada por un vértice, pero si ponemos un número distinto de 0 obtendríamos una figura truncada.

Otra variable (booleana) importante en todas las figuras es “center”. Con ella podemos orientar las figuras a partir de su centro o de una esquina. Es aconsejable que todas las figuras tengan la misma referencia a la hora de parametrizar o conocer las distancias de unas a otras.

UNIÓN: se unirán todos los objetos codificados entre llaves. No debemos olvidar los paréntesis que acompañan a la función.

```
union()
{
  sphere(6, $fn=50);

  cylinder(r=3, h=17, $fn=50, center=true);

  rotate([0,90,0])
  cylinder(r=3, h=17, $fn=50, center=true);

  rotate([90,0,0])
  #cylinder(r=3, h=17, $fn=50, center=true);
}
```

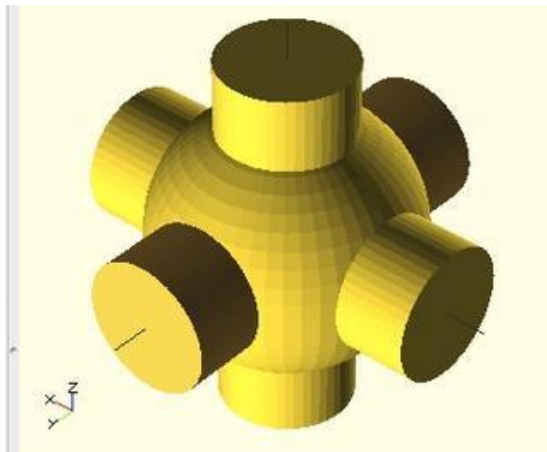


Figura A.6 Ejemplo de unión para generar geometrías.

DIFERENCIA: se sustrae del primer elemento los siguientes. Todos ellos han de estar comprendidos entre las llaves.

```
difference()
{
  sphere(6, $fn=50);

  cylinder(r=3, h=17, $fn=50, center=true);

  rotate([0,90,0])
  cylinder(r=3, h=17, $fn=50, center=true);

  rotate([90,0,0])
  #cylinder(r=3, h=17, $fn=50, center=true);
}
```

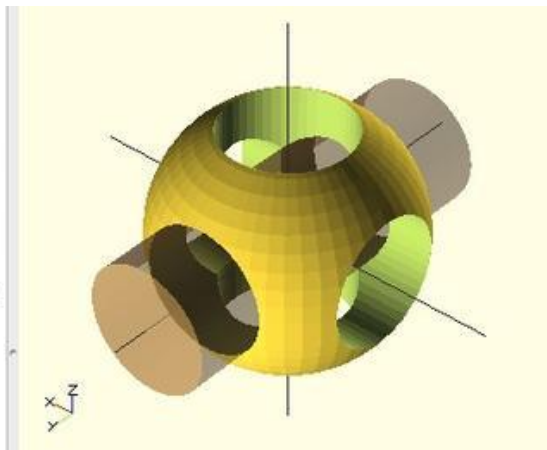


Figura A.7 Ejemplo de diferencia para generar geometrías.

TRANSLATE([x,y,z]): traslada el objeto las distancias especificadas en cada eje.

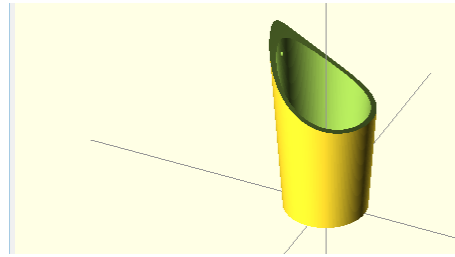
ROTATE ([x,y,z]): la pieza rota alrededor de cada eje el valor en grados especificado.

Ahora se mostrarán los programas implementados para cada una de las piezas fabricadas para la construcción del prototipo.

Conclusiones

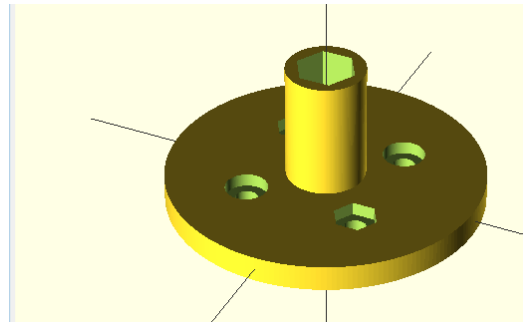
Dedal

```
difference() {
  cylinder (h = 40, r1=8, r2=10.5, center = false, $fn=200);
  translate([0,0,1])cylinder (h =40, r1=7, r2=9.5, center = false, $fn=200);
  translate([10,10,42])rotate([90,0,0])cylinder (h =50, r=21, center = true, $fn=200);
  translate([0,0,30])rotate([90,0,90])cylinder (h =50, r=0.5, center = true, $fn=200);
}
```



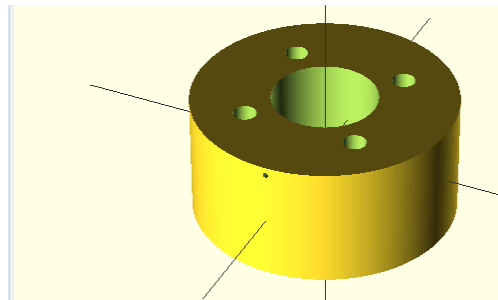
Tambor (interior)

```
difference() {
  union(){
    cylinder (h = 5, r=30, center = true, $fn=200);
    cylinder (h =25, r=7.5, center = false, $fn=200);
  }
  cylinder (h =100, r=5.8, center = true, $fn=6);
  translate([11, 11, 0])cylinder (h =20, r=4, center = false, $fn=200);
  translate([11, 11, 0])cylinder (h =20, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([-11, -11, 0])cylinder (h =20, r=4, center = false, $fn=200);
  translate([-11, -11, 0])cylinder (h =20, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([-11, 11, 0])cylinder (h =20, r=4.25, center = false, $fn=6);
  translate([-11, 11, 0])cylinder (h =20, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([11, -11, 0])cylinder (h =20, r=4.25, center = false, $fn=6);
  translate([11, -11, 0])cylinder (h =20, r=2.2, center = true, $fn=200);
}
```



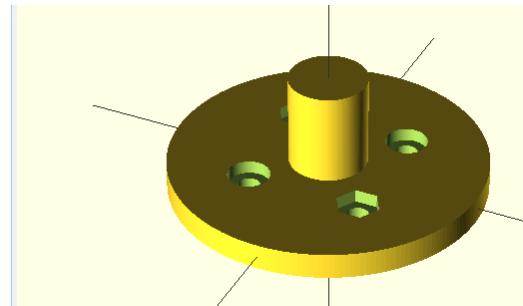
Tambor (centro)

```
difference() {
  cylinder (h = 23, r=25, center = true, $fn=200);
  translate([11,11,0])cylinder (h =150, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([11,-11,0])cylinder (h =150, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([-11,-11,0])cylinder (h =150, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([-11,11,0])cylinder (h =150, r=2.2, center = true, $fn=200);
  cylinder (h =150, r=10, center = true, $fn=200);
  translate([0,0,10])rotate([90,0,0])cylinder (h =100, r=0.5, center = false, $fn=200);
  translate([0,50,-10])rotate([90,0,0])cylinder (h =50, r=0.5, center = false, $fn=200);
}
```



Tambor (exterior)

```
difference() {
  union(){
    cylinder (h = 5, r=30, center = true, $fn=200);
    cylinder (h =20, r=7.4, center = false, $fn=200);
  }
  translate([11, 11, 0])cylinder (h =20, r=4, center = false, $fn=200);
  translate([11, 11, 0])cylinder (h =20, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([-11, -11, 0])cylinder (h =20, r=4, center = false, $fn=200);
  translate([-11, -11, 0])cylinder (h =20, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([-11, 11, 0])cylinder (h =20, r=4.25, center = false, $fn=6);
  translate([-11, 11, 0])cylinder (h =20, r=2.2, center = true, $fn=200);
  translate([11, -11, 0])cylinder (h =20, r=4.25, center = false, $fn=6);
  translate([11, -11, 0])cylinder (h =20, r=2.2, center = true, $fn=200);
}
```



Apoyo

```
difference(){
  cube([50, 30, 5], center=true);
  translate([20,10,0])cylinder (h =150, r=2, center = true, $fn=200);
  translate([20,-10,0])cylinder (h =150, r=2, center = true, $fn=200);
  translate([-20,-10,0])cylinder (h =150, r=2, center = true, $fn=200);
  translate([-20,10,0])cylinder (h =150, r=2, center = true, $fn=200);
  translate([20,10,0])cylinder (h =5, r1=0, r2=3.75, center = true, $fn=200);
  translate([20,-10,0])cylinder (h =5, r1=0, r2=3.75, center = true, $fn=200);
  translate([-20,-10,0])cylinder (h =5, r1=0, r2=3.75, center = true, $fn=200);
  translate([-20,10,0])cylinder (h =5, r1=0, r2=3.75, center = true, $fn=200);
}
difference(){
  union(){
    translate([0,0,25])rotate([90,0,0])cube([30, 50, 15], center=true);
    translate([0,0,50])rotate([90,0,0])cylinder (h =15, r=20, center = true, $fn=200);
  }
  translate([0,5,50])rotate([90,0,0])cylinder (h =15, r=16.5, center = true, $fn=200);
  translate([0,5,50])rotate([90,0,0])cylinder (h =30, r=10, center = true, $fn=200);
}
```

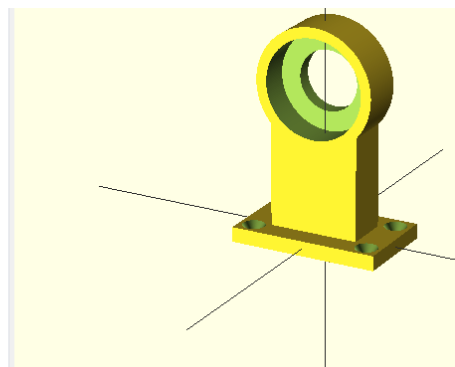


Figura A.8 Código de figuras diseñadas.

Tras programar las diferentes piezas, hemos de generar el archivo con extensión *.stl para poder imprimir en la impresora 3D.

A2.2 Impresión

La impresora que se va a utilizar es de la marca Makerbot, y el programa que precisa para su correcto funcionamiento es el ReplicatorG que también es software libre. Este programa es capaz de abrir los archivos generados con extensión *.stl y a partir de ellos se configuran las características de la impresión.

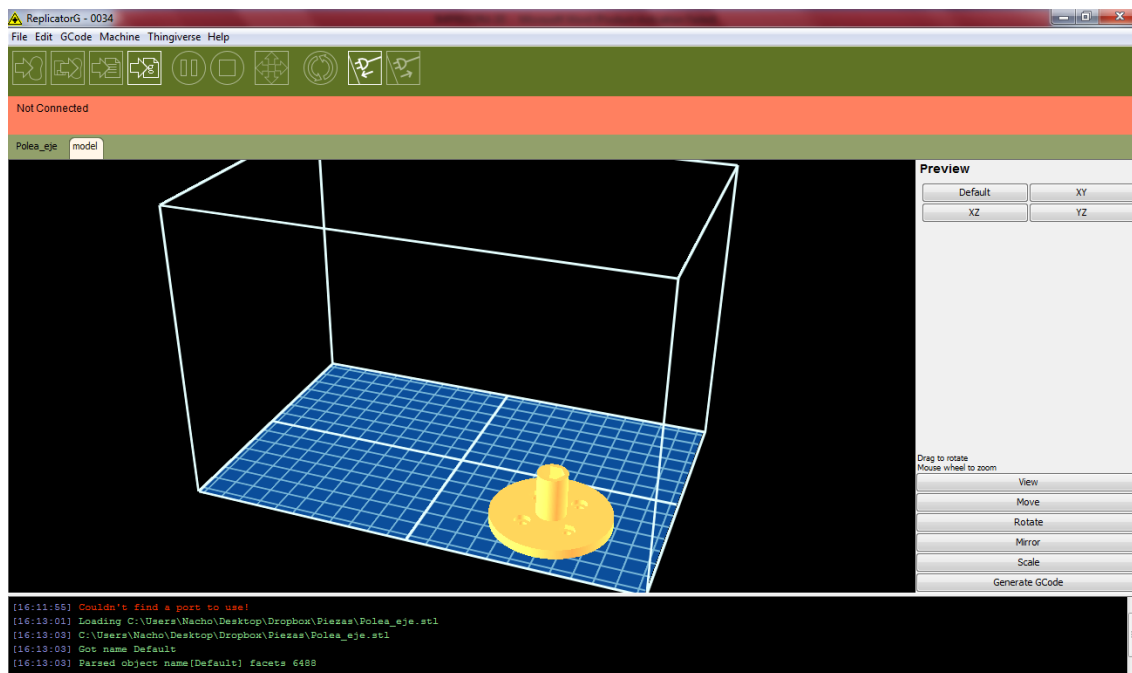


Figura A.9 Apariencia del programa ReplicatorG.

En este programa se posiciona la pieza en el lugar exacto y se ajustan parámetros como la densidad de la pieza fabricada, el número de capas del contorno, etc. Otra opción disponible es la de incorporar un base inferior en la pieza (raft) de manera que la calidad de la impresión mejora evitando problemas en la primera capa de material. Cuando la impresión concluye, esta base se desprende fácilmente (Figura).

Previamente es necesario conectar la impresora con el programa con un botón de la barra de herramientas. Cuando la configuración esté lista, se tiene que pulsar el botón de generar Gcode. Este archivo contiene el código traducido que entiende la impresora, código de bajo nivel. En función de las dimensiones y formas de la pieza, esta generación puede tardar varios minutos. También existe la opción de estimar el tiempo de impresión, información muy interesante dada la baja velocidad de impresión.



Figura A.10 Pieza sobre base raft.

Con estos pasos, las piezas son imprimidas y listas para su uso.

Conclusiones

A3 Caracterización del motor de corriente continua

Para la implementación del sistema de medida de corriente, par y fuerza, es necesaria la modelización del motor. Para ello se parte del modelo equivalente de un motor de corriente continua sin escobillas (Figura).

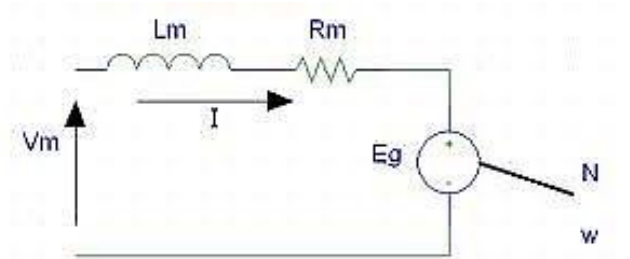


Figura A.11 Modelo equivalente motor DC.

Imponiendo un balance de potencias y con los datos aportados por la hoja de características del motor, se obtiene:

$$P_{out} = P_{in} \cdot \eta \quad (9.1)$$

$$P_{out} = 83,2w \quad (9.2)$$

$$\eta = 83\% \quad (9.3)$$

$$P_{in} \approx 100w \quad (9.4)$$

$$P_{in} = V_m \cdot i + i^2 \cdot R_m + j\omega L_m \cdot i \quad (9.5)$$

Al tratarse de un motor de corriente continua, la bobina se puede aproximar a un cortocircuito, ya que la frecuencia es nula. Por lo tanto, sustituyendo los datos conocidos y despejando la intensidad, queda:

$$R_m = 1,63\Omega \quad (9.6)$$

$$V_m = 24V \quad (9.7)$$

$$i = \frac{-24 \mp 35,04}{3,26} (A) \quad (9.8)$$

La ecuación 9.8 Proporciona dos resultados. Uno de ellos es negativo por lo que no se considera por carecer de sentido físico, ya que significaría que el motor genera energía. Luego:

$$i \approx 3,38 \quad (9.9)$$

La intensidad calculada es el valor nominal, por lo que a partir de ahora se le representará como i_m . Además, la relación entre fuerza, par e intensidad es:

$$T = F \cdot d = k_M \cdot i \quad (9.10)$$

De donde se puede obtener el valor de la fuerza ejercida por el motor en función de la constante de torque, la intensidad consumida y la distancia al punto de aplicación de la fuerza.

$$F = \frac{k_M \cdot i_m}{d} = \frac{37,7 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m/A} \cdot 3,38 \text{ A}}{2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 50,97 \quad (9.11)$$

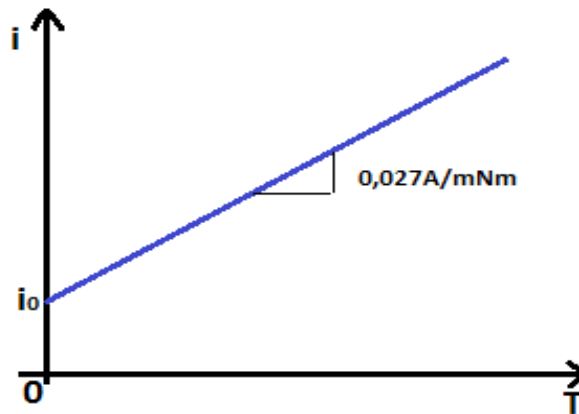


Figura A.12 Gráfico intensidad-par del motor.

Como se observa en la Figura , existe una intensidad de vacío que no aporta fuerza ni par a la medida que se quiere conseguir. Además, se extrae de las hojas de catálogo del motor, la constante que relaciona ambas magnitudes.

$$i_0 = 0,129 \quad (9.12)$$

$$k_I = 0,027 \text{ A/mN} \cdot \text{m} \quad (9.13)$$

$$i = i_0 + k_I \cdot d \quad (9.14)$$

Sustituyendo el valor de la intensidad nominal de la ecuación 9.14, se obtiene el valor de la fuerza nominal ejercida por el motor:

$$F_{3,38 \text{ A}} = 48,16 \quad (9.15)$$

Conclusiones

A4 Datasheet Hardware

A continuación se adjuntan las hojas de catálogo más importantes de cada uno de los dispositivos utilizados.



QUANSER
INNOVATE. EDUCATE.

CONTROL SOLUTIONS

QNX
PARTNER
NETWORK

QNX
AND SOFTWARE SYSTEMS

Maplesoft
Mathematics • Modeling • Simulation

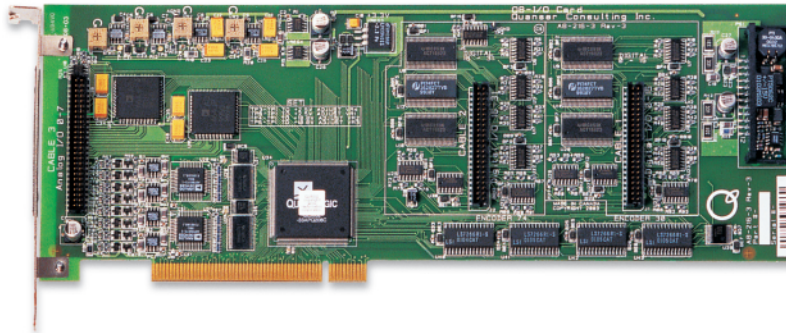
LabVIEW

SIMULINK
Enabled
MathWorks Partner

Q8 High-Performance H.I.L. Control Board

Product Information Sheet C1 - 1 - rev. D

Also available
in Q4 version



Applications:

- Rapid Control Prototyping
- Real-Time Simulation
- Hardware-in-the-Loop Testing
- Robotics
- Hardware Controller Design
- Monitor & Control Production Equipment
- Process Control
- Automation
- And Many More

Designed by controls engineers FOR controls engineers!

Description

Quanser's innovative Q8 Hardware-in-the-Loop (H.I.L.) Control Board is a versatile and powerful real-time measurement and control board offering an extensive range of hardware features and software support.

This robust single-board solution was developed for multifaceted control systems and complex measurement applications. With the Q8's wide range of inputs and outputs, you can easily connect and control a wide variety of devices instrumented with analog and digital sensors, including quadrature encoders – all with one board!

The open-architecture Q8 is extensively supported by leading real-time targets including QuaRC, xPC and RT-Lab. The Q8 SDK also provides APIs for C, C++, ActiveX, .NET, LabVIEW, MATLAB and MATRIXx. Windows XP driver is provided together with Ardence RTX drivers for real-time operations. The Q8 supports the tools and environments you work with every day, regardless of your design.

With ultra-low I/O conversion times and simultaneous sampling of each I/O type, the Q8 is ideal for all complex controls configurations. Additional Q8 boards can be added in an unlimited master-slave arrangement to support more I/O channels.

Visit www.quanser.com/qstudiop for additional information regarding software tools and board features.

- Extensive I/O:
 - 8 A/D
 - 8 D/A
 - 8 encoder inputs
 - 32 DIO
- Simultaneous sampling of all A/D, encoder and DIO
- Simultaneous update of D/A and DIO
- Supported by industrial real-time targets:
 - QuaRC for Windows
 - QuaRC for QNX
 - xPC
 - RT-LAB
- Q8 SDK supports many APIs & drivers

Key Features

- Optimized for real-time control performance with proven real-time targets or custom code
- No expensive or inflexible DSP used, all processing via CPU
- Quick-connect terminal board and cabling provided
- Programmable counters and watchdog timer for maximum safety and flexibility
- Full register information provided for custom driver development
- Multiple OS compatibility: Windows XP, Windows Vista, Ardence RTX, QNX
- Multiple boards configurable in master-slave approach

Requirements

- Full-Size PCI Slot (board is 275mm x 98mm / 11" x 3 15/16")



QUANSER
INNOVATE. EDUCATE.

Specification and Features

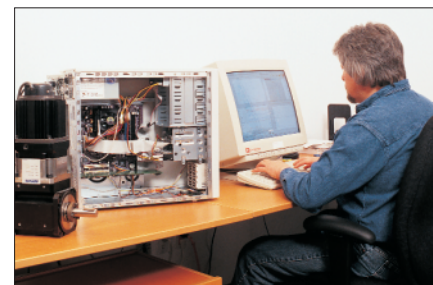
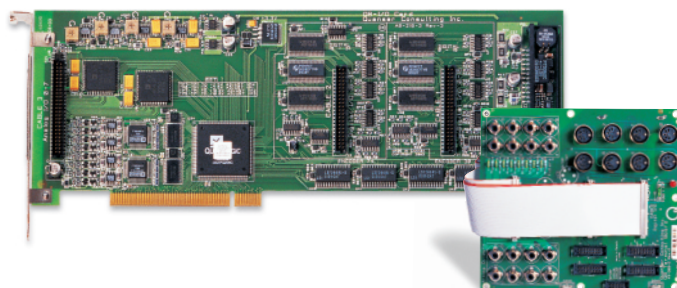
CONTROL SOLUTIONS

Q8 High-Performance H.I.L. Control Board

Product Information Sheet C1 - 2 - rev. D

GENERAL	
Interface	PCI
PCI Bus Width	32-bit
Bus Speed	33 MHz
ANALOG INPUTS	
Channels	8 SE
Resolution	14-bit
Input Range (fixed)	$\pm 10V$
Conversion Time & Sampling Frequency*	
1 or 2 channels simultaneous	5.2 μs / 192 kHz
All 8 channels simultaneous	17.8 μs / 56 kHz
* The values above are measurements of the computation time of the I/O specified. On-board hardware FIFO allows A/D conversions to be performed in the background by the hardware, thus permitting control calculations and A/D to be overlapped.	
Features	
Simultaneous Sample & Hold	
ANALOG OUTPUTS	
Channels	8
Resolution	12-bit
Slew Rate	2.5 V / μs
Output range:	
Bipolar:	$\pm 5V$, $\pm 10V$
Unipolar:	0-10V
Conversion Time **	
1 channel	0.62 μs
2 channels simultaneous	0.62 μs
8 channels simultaneous	1.35 μs
** The values above are measurements of time to write to the D/A. On-board double-buffering allows D/A conversions to be performed in the background by the hardware, thus permitting control calculations and D/A to be overlapped.	
Features	
Individual mode and gain selectability	
Known state on power-up or reset	
Simultaneous output	
ENCODER INPUT COUNTERS	
Quadrature Encoder Inputs supported	8
Counter size	24-bit
Max. A and B Frequency in Quadrature	2 MHz
Max. Count Frequency in 4X Quadrature	8 MHz
Max. Count Frequency in Non-quadrature	15 MHz
Conversion Time	
Single Encoder Read	2.50 μs
4 Simultaneous Encoder Reads	2.50 μs
All 8 channels simultaneous	4.72 μs
Features	
Simultaneous Sampling	
Single-Ended Inputs	
Non-quadrature (count/direction) and 1X, 2X or 4X quadrature modes	
Extensive Index Pulse Signal Support	
Individually programmable count and index modes, and filter clocks	
TTL/CMOS compatible	

DIGITAL I/O	
Number of lines	32
Conversion Time	
Single Digital Output	0.18 μs
Multiple Digital Output (32 lines)	0.18 μs
Single Digital Input	0.68 μs
Multiple Digital Input (32 lines)	0.79 μs
Features	
Totem-pole outputs	
Known state on power-up or reset	
Individually Software Programmable	
Single access read/write of all channels	
GENERAL PURPOSE COUNTER-TIMERS	
Number of counter-timers	2
Counter-Timer Size	32-bit
Timer Resolution	30 ns
Features	
Configurable as PWM Outputs	
One Counter Configurable as Watchdog Timer	
One Counter Allows Hardware Gating	
Software enabling/disabling	
WATCHDOG TIMERS (reconfigured GP Counter-Timers)	
User programmable Watchdog Timers	1
Features	
Software enabling/disabling	
Automatic reset of Analog Outputs & Digital I/O	
PWM OUTPUTS (reconfigured GP Counter-Timers)	
User-programmable PWM outputs	2
EXTRA FEATURES	
Fused Encoder Section with LED status	
Fuse monitoring with watchdog and interrupt capability	
55 configurable interrupt sources	
External A/D Triggering Support	
SOFTWARE SUPPORT	
Real-Time Target Support ***	
Quanser QuaRC for Windows®, QuaRC for QNX	
The Mathworks xPC Target	
OPAL-RT RT-LAB	
National Instruments LabVIEW	
*** Software support provided by their respective vendors.	
OS Drivers	
Microsoft® Windows® XP and Windows Vista®	
QNX®	
Ardenne RTX	
API	
C	
C++	
ActiveX	
.NET (VB, C#, C++ and others)	
LabVIEW	
MATLAB	
MATRIXx	








With Quanser the possibilities are infinite

+1 (905) 940-3575 www.quanser.com

Products and/or services referred to herein are trademarks or registered trademarks of Quanser Inc. and/or its affiliates. Other product and company names mentioned herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners. © 2008 Quanser Inc. All rights reserved. Specifications are subject to change without notice. Errors and omissions excepted.

QuARC® V.2.0 SOFTWARE COMPATIBILITY CHART

HOST COMPUTER

TARGET TYPES	Host Operating System*	Windows OS Service Pack (SP)	Compiler Tools	MATLAB, Simulink, RTW, Control System Toolbox (for labs)					
				R2007a	R2007b	R2008a	R2008b	R2009a	R2009b
WINDOWS****		SP2 or SP3	MS VS**, or C++ Prof. or Express Ed. SP1						
			2005 (8.0)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		No SP or SP1	2008 (9.0)	N/A	N/A	N/A	✓	✓	✓
			2005 (8.0)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
QNX X86****		SP2 or SP3	QNX Momentics x86***						
		No SP or SP1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LINUX ARM (GUMSTIX)****		SP2 or SP3	No compiler tools required	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		No SP or SP1		✓	✓	✓	✓	✓	✓

1009-20

* 32-Bit Windows OS

** MS Visual Studio 2008 (9.0) is supported by MATLAB R2008b or higher version only

*** Cross-Hosted QNX 6.3.2 Development Tool for Microsoft Windows

**** Windows target requires MS Windows XP Professional with SP2 or SP3 or Vista with no SP or SP1

QNX x86 target requires QNX Neutrino 6.3.2

Linux ARM (Gumstix) target requires a Verdex Pro XL6P board with OpenEmbedded root filesystem customized for QuaRC (provided by Quanser)

DC-Micromotors

Graphite Commutation

70 mNm

For combination with

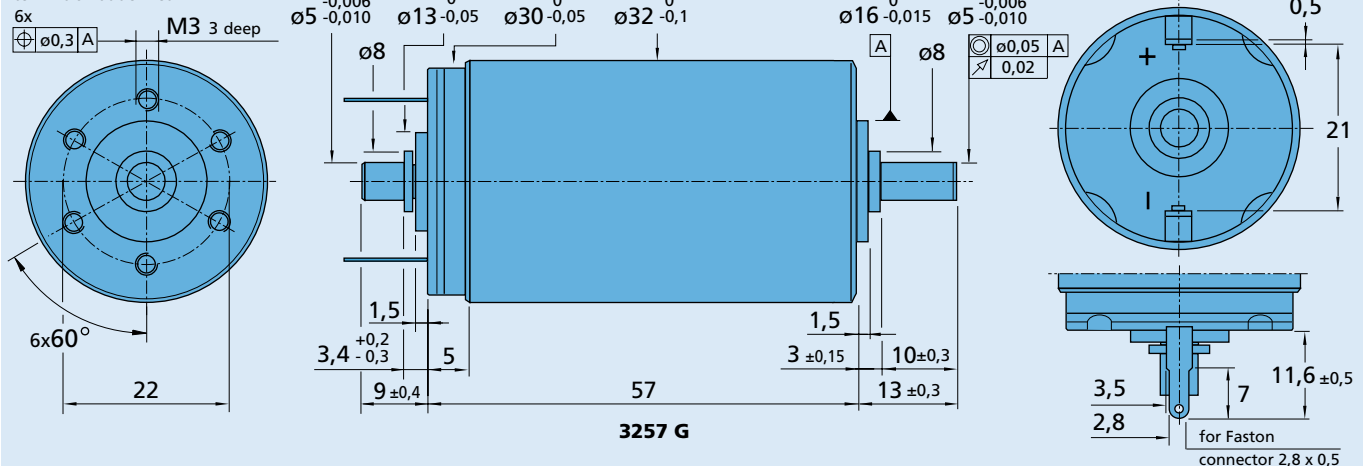
Gearheads:
32A, 32/3, 38/1, 38/2

Encoders:
IE2 – 16 ... 512, IE3 – 256, IE3 – 256 L, 5500, 5540

Series 3257 ... CR

	3257 G		012 CR	024 CR	048 CR	
1 Nominal voltage	U_N		12	24	48	Volt
2 Terminal resistance	R		0,41	1,63	6,56	Ω
3 Output power	$P_{2 \text{ max.}}$		79,2	83,2	84,5	W
4 Efficiency	$\eta_{\text{max.}}$		83	83	83	%
5 No-load speed	n_o		5 700	5 900	5 900	rpm
6 No-load current (with shaft \varnothing 5,0 mm)	I_o		0,258	0,129	0,064	A
7 Stall torque	M_H		531	539	547	mNm
8 Friction torque	M_R		4,9	4,9	4,9	mNm
9 Speed constant	k_n		500	253	125	rpm/V
10 Back-EMF constant	k_E		2,00	3,95	7,98	mV/rpm
11 Torque constant	k_M		19,1	37,7	76,2	mNm/A
12 Current constant	k_I		0,052	0,027	0,013	A/mNm
13 Slope of n-M curve	$\Delta n/\Delta M$		10,7	10,9	10,8	rpm/mNm
14 Rotor inductance	L		70	270	1 100	μH
15 Mechanical time constant	τ_m		4,7	4,7	4,7	ms
16 Rotor inertia	J		42	41	42	gcm^2
17 Angular acceleration	$\alpha_{\text{max.}}$		130	130	130	$\cdot 10^3 \text{rad/s}^2$
18 Thermal resistance	$R_{\text{th 1}} / R_{\text{th 2}}$	2 / 8				K/W
19 Thermal time constant	τ_{w1} / τ_{w2}	17 / 810				s
20 Operating temperature range:						
– motor		– 30 ... + 125				$^{\circ}\text{C}$
– rotor, max. permissible		+ 155				$^{\circ}\text{C}$
21 Shaft bearings		ball bearings, preloaded				
22 Shaft load max.:						
– with shaft diameter		5,0				mm
– radial at 3 000 rpm (3 mm from bearing)		50				N
– axial at 3 000 rpm		5				N
– axial at standstill		50				N
23 Shaft play:						
– radial	\leq	0,015				mm
– axial	$=$	0				mm
24 Housing material		steel, black coated				
25 Weight		242				g
26 Direction of rotation		clockwise, viewed from the front face				
Recommended values - mathematically independent of each other						
27 Speed up to	$n_{\text{e max.}}$		5 000	5 000	5 000	rpm
28 Torque up to	$M_{\text{e max.}}$		70	70	70	mNm
29 Current up to (thermal limits)	$I_{\text{e max.}}$		4,60	2,30	1,15	A

Orientation with respect to motor terminals not defined



Brakes

Electromagnetically Released System

For combination with
DC-Micromotors:
2342, 2642, 2657, 3242, 3257, 3557, 3863
Brushless DC-Servomotors:
2444, 3056, 3564, 4490

Series MBZ

	MBZ	12 V	22 V	24 V	
Nominal coil data at 20°C					
Supply voltage (DC) $\pm 10\%$	U_N	12	22	24	Volt
Resistance	R	24	81	96	Ω
Current	A	0,50	0,27	0,25	A
Power	$P_2 \text{ max.}$	6	6	6	W
Mechanical response times ¹⁾					
Coupling time		13			ms
Disconnection time		27			ms
Static torque rating ²⁾					
Static torque rating ²⁾		400			mNm
Moment of inertia		10			gcm ²
Max. permissible speed					
Max. permissible speed		16 000			rpm
Temperature range: ³⁾					
Operating temperature		- 5...+ 120			°C
Storage temperature		-25...+ 55			°C
Weight					
Weight		50			g

¹⁾ Depending on the requirements, a Switch-off voltage-limitation function can be applied using an anti-parallel diode, varistor or other.

However, this will influence the brake switching time.

²⁾ Under dry operation conditions, absolutely oil-free.

³⁾ Non condensing atmosphere.

Features

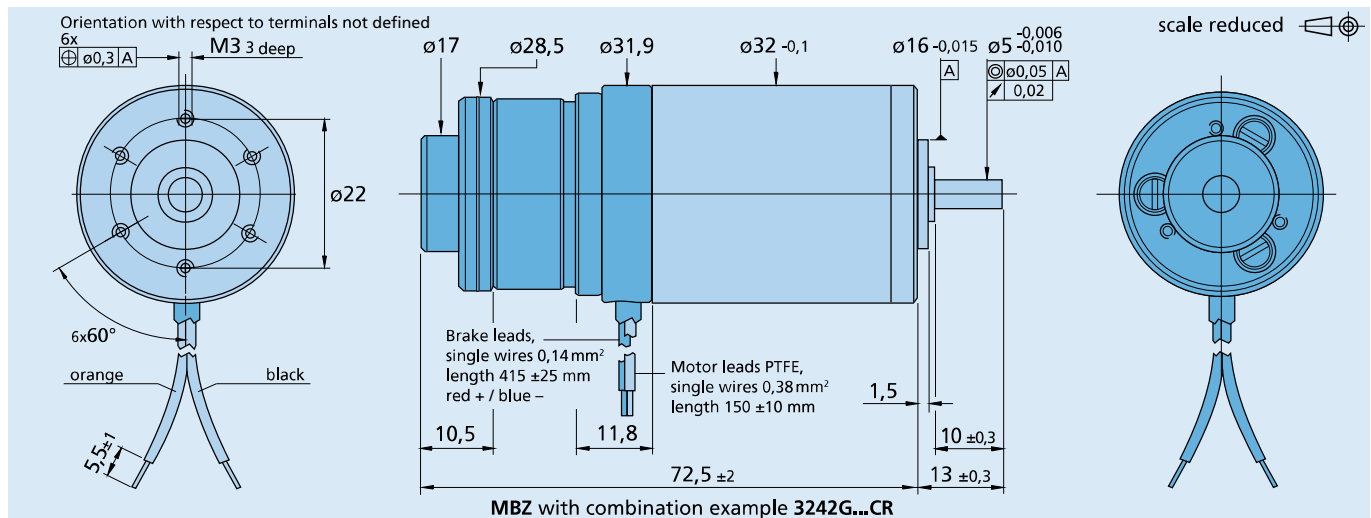
The brakes are designed as DC operated permanentmagnet single-surface brakes characterised by the fact that the braking effect is produced by a permanentmagnetic field (electromagnetically released system). This means that the required braking force is generated when voltage is removed.

In order to neutralise the braking effect, the permanentmagnetic field is counteracted by an opposing electromagnetic field.

The brakes are intended only for use as holding brakes (unsuitable for braking rotating motor shaft).

Full product description

■ Examples:
3242G024CR MBZ22V



Encoders

Optical Encoders with Line Driver

Features:
 500 Pulses per revolution
 3 Channels + complementary outputs
 Digital output
 Line driver

Series 5540

See beginning of the Encoder Section for Ordering Information

HEDL 5540			
Pulses per revolution	N	500	
Signal output, (quadrature)		2+1 index and complementary outputs	channels
Supply voltage	V _{cc}	4.5 to 5.5	V DC
Current consumption, typical (V _{cc} = 5 V DC)	I _{cc}	57	mA
Pulse width	P	180 ± 35	°e
Index pulse width	P _o	90 ± 35	°e
Phase shift, channel A to B	Φ	90 ± 15	°e
Logic state width	S	90 ± 35	°e
Cycle	C	360 ± 5.5	°e
Signal rise/fall time, typical	tr/tf	0.25 / 0.25	µs
Frequency range ¹⁾	f	up to 100	kHz
Inertia of code disc	J	8.497 · 10 ⁻⁶	oz-in-sec ²
Operating temperature range		0 to 70 (32 to 158)	°C (°F)

¹⁾ Velocity (rpm) = f (Hz) x 60/N

Ordering information

Encoder type	number of channels	pulses per revolution	For combination with:
HEDL 5540 A	2+1	500	DC-Micromotors and DC-Motor-Tachos Series 2230, 2233, 2251 2338, 2342 2642, 2657, 2842 3042, 3557, 3863 brushless DC-Servomotors Series 2036, 2444, 3564

The housing dimensions of the HEDL encoder are the same as the HEDS/HEDM encoders, but there is a ribbon cable instead of plain connector pins

Suggested Line Receivers: LT-1

Features

These incremental shaft encoders in combination with the FAULHABER DC-Micromotors and brushless DC-Servomotors are designed for indication and control of both, shaft velocity and direction of rotation as well as for positioning.

A LED source and lens system transmits collimated light through a low inertia metal disc to give two channels with 90° phase shift.

The index pulse is synchronized with the channel B.
 Each encoder channel provides complementary output signals.

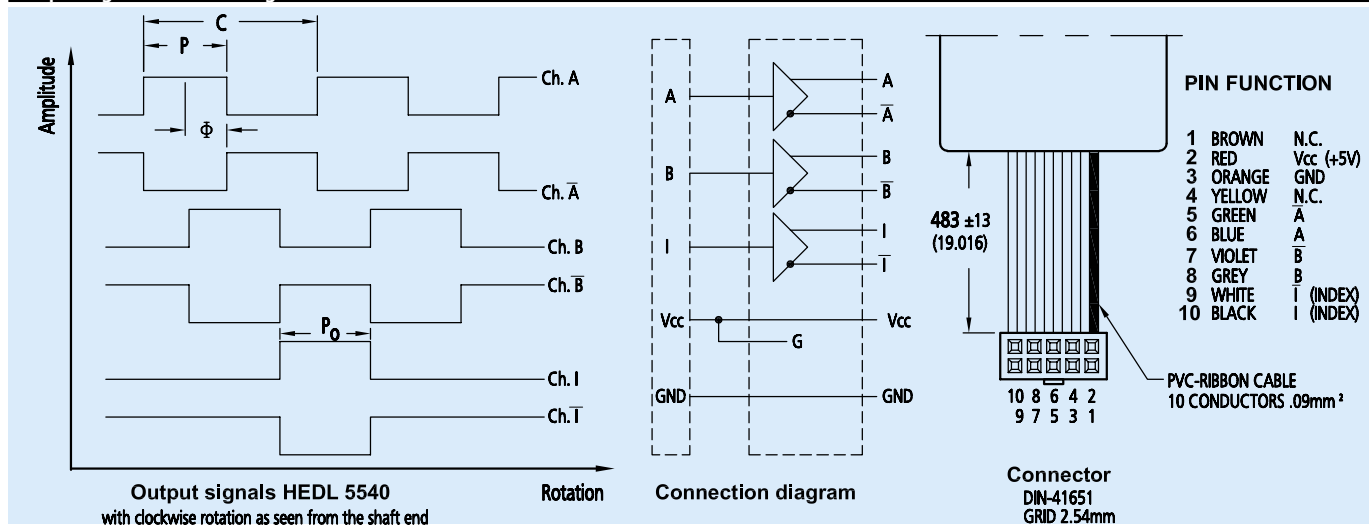
The single 5 volt supply and the digital output signals are interfaced with a connector.

The line driver offers enhanced performance when the encoder is used in noisy environments, or when it is required to drive long distances.

Motor with ball bearings are recommended for continuous operation at low and high speeds and for elevated radial shaft load.

Details for the motors and suitable reduction gearheads are on separate catalog pages.

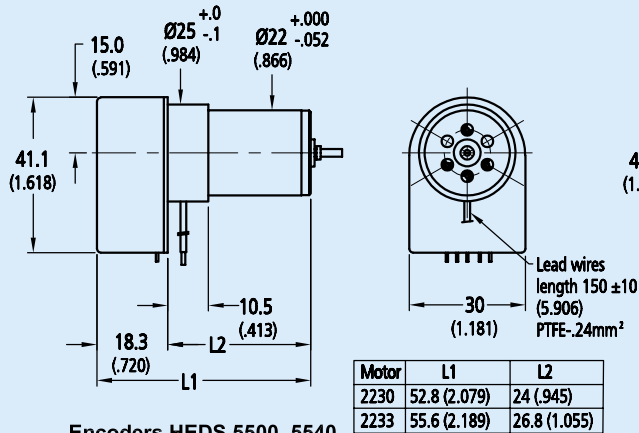
Output signals / Circuit diagram / Connector information



For notes on technical data refer to "Technical Information". Specifications subject to change without notice. MIME0402

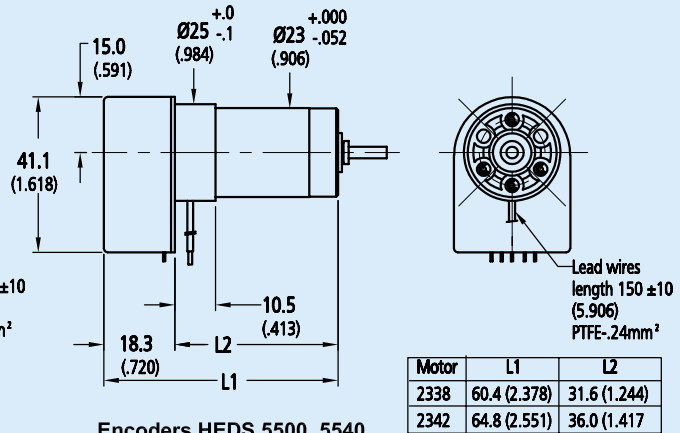
Series 5500, 5540

HEDS 5500, 5540 with motors 2230, 2233



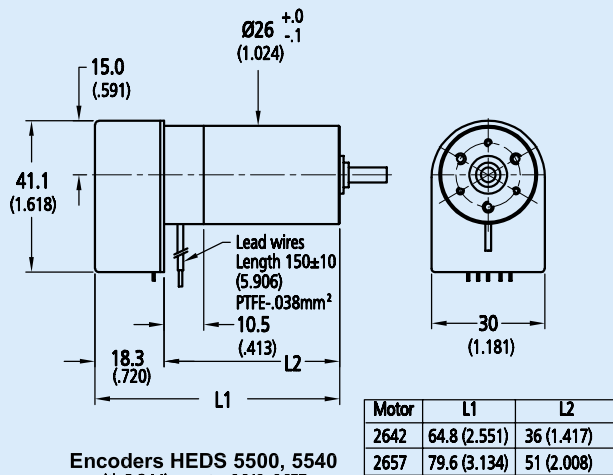
Encoders HEDS 5500, 5540
DC-MICROMOTORS 2230, 2233

HEDS 5500, 5540 with motors 2338, 2342



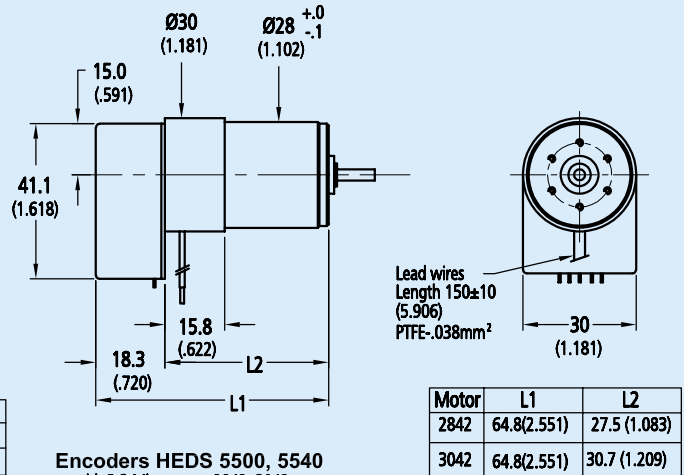
Encoders HEDS 5500, 5540
DC-MICROMOTORS 2338, 2342

HEDS 5500, 5540 with motors 2642, 2657



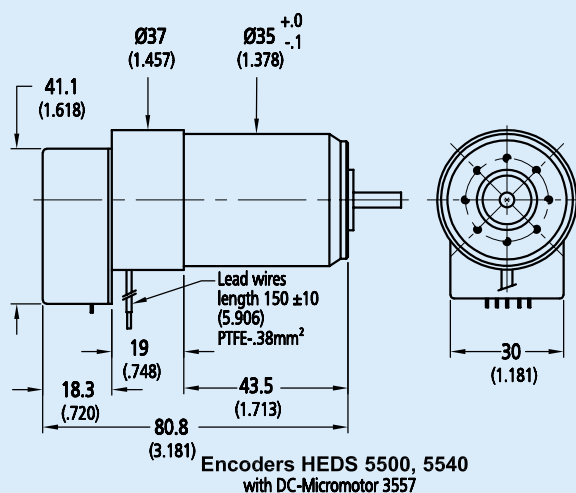
Encoders HEDS 5500, 5540
with DC-Micromotor 2642, 2657

HEDS 5500, 5540 with motors 2842, 3042



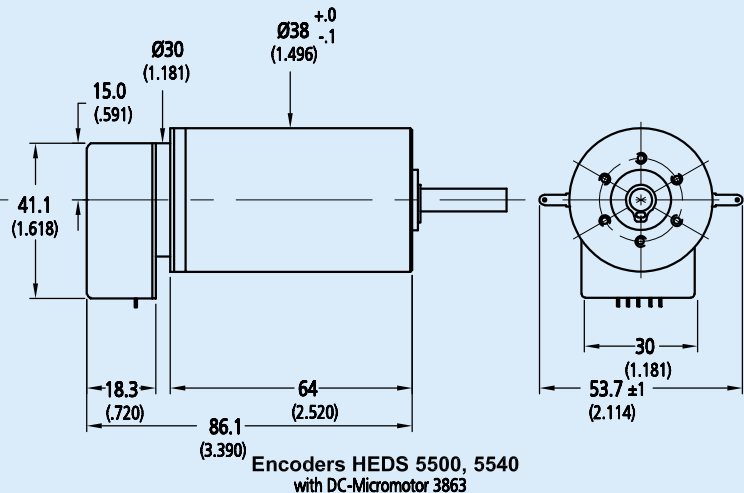
Encoders HEDS 5500, 5540
with DC-Micromotor 2842, 3042

HEDS 5500, 5540 with motor 3557



Encoders HEDS 5500, 5540
with DC-Micromotor 3557

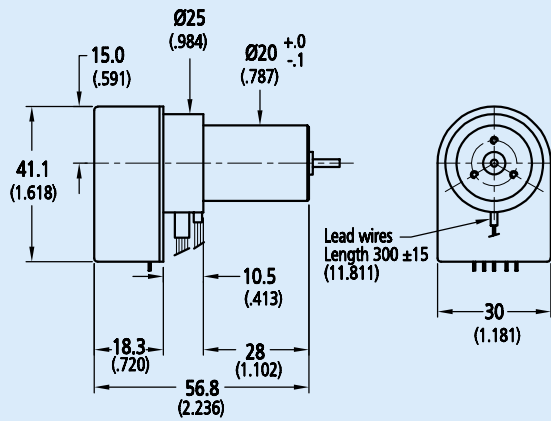
HEDS 5500, 5540 with motor 3863



Encoders HEDS 5500, 5540
with DC-Micromotor 3863

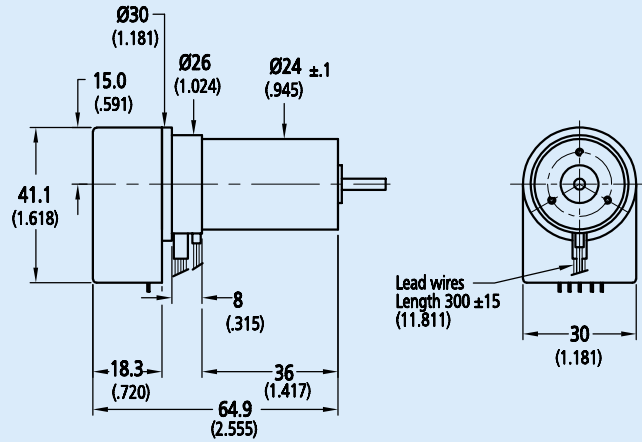
Series 5500, 5540

HEDS 5500, 5540 with Brushless Servomotor 2036 U ... B K312



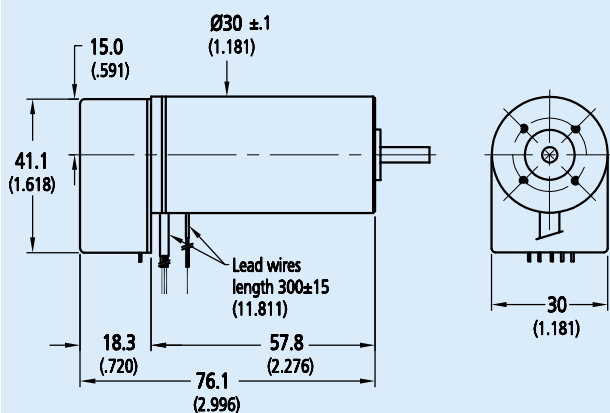
Encoders HEDS 5500, 5540
with Brushless DC-Servomotor- 2036 U ... B K312

HEDS 5500, 5540 with Brushless Servomotor 2444S ... B K312



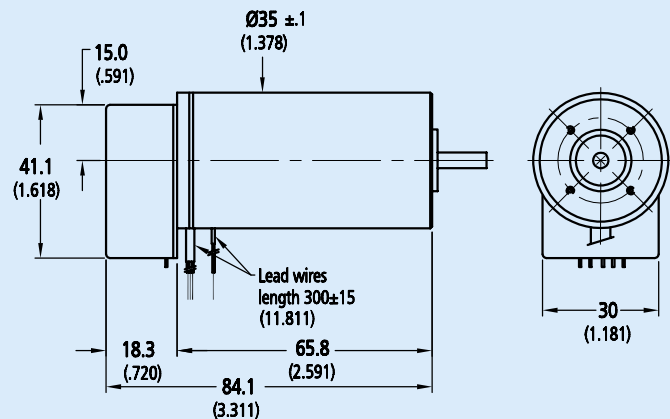
Encoders HEDS 5500, 5540
with Brushless DC-Servomotor 2444 S ... B K312

HEDS 5500, 5540 with Brushless Servomotor 3056 K ... B K312



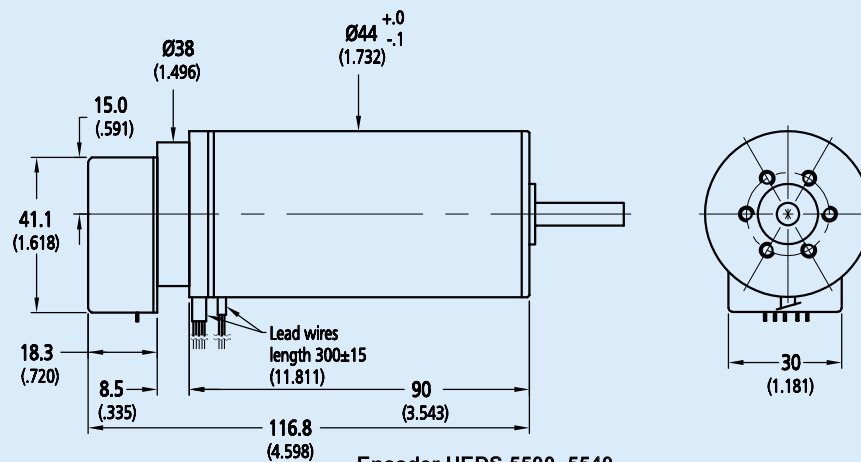
Encoders HEDS 5500, 5540
with Brushless DC-Servomotor 3056 K ... B K312

HEDS 5500, 5540 with Brushless Servomotor 3564 K ... B K312



Encoders HEDS 5500, 5540
with Brushless DC-Servomotor 3564 K ... B K312

HEDS 5500, 5540 with Brushless Servomotor 4490 K ... B K312



Encoder HEDS 5500, 5540
with Brushless DC-Servomotor 4490K ... B K312

Motion Controller

4-Quadrant PWM

For combination with:
DC-Micromotors

Series MCDC 2805

		MCDC 2805	
Power supply	U_B	12 ... 28	V DC
PWM switching frequency	f_{PWM}	62,5	kHz
Efficiency	η	95	%
Max. continuous output current	I_{dauer}	5	A
Max. peak output current	I_{max}	10	A
Total standby current	I_{el}	0,06	A
Speed range		10 ... 30 000	rpm
Output voltage for external use	V_{CC}	5	V DC
– Max. load current	I_{CC}	60	mA
Input Nr. 1 ¹⁾	input resistance	18	k Ω
Speed command analog	voltage range	± 10	V
	slope of the working curve	1000 ²⁾	rpm/V
Current command digital	PWM Signal	low 0 ... 0,5 / high 4 ... 30	V
	frequency range	100 ... 2 000	Hz
	pulse duty factor 50%	0	rpm
	pulse duty factor < 50%	ccw rotation	
	pulse duty factor > 50%	cw rotation	
Step frequency	f_{max}	100	kHz
Input Nr. 2 (Fault output)	open collector	max. U_B / 30 mA	
	no error	switched to GND	
	programmed as input	low 0 ... 0,5 / high 4 ... U_B	V
Input Nr. 3/Nr. 4/Nr. 5	logic level	low 0 ... 0,5 / high 4 ... 30	V
Encoder inputs	Max. Signal frequency	200	kHz
Serial port	RS232	9 600 (1 200, 2 400, 4 800, 19 200)	Baud
Program memory	Serial EEPROM	7 936	Bytes
Operating temperature range		0 ... + 70	°C
Storage temperature		- 25 ... + 85	°C
Weight		110	g

¹⁾ Can be changed over the RS232 port (factory setting: command velocity is analog).

²⁾ Preset value. Can be changed over the RS232 port.

Note: The Motion Controller is supplied with detailed operating instruction manual for installation and start-up.

General information

The MCDC 2805 was designed for Faulhaber DC-Micromotors. In combination with the reliable IE2-512 encoder, positioning resolution up to 0.18 degrees can be achieved even at very low speeds. The motion controller is based on a powerful 16-Bit microcontroller with excellent filtering quality.

Maximum Power:

- Velocity Control: high performance speed synchronization and the lowest possible torque variance even in the most demanding of applications. A PI-controller makes sure that the command position is accurately achieved.
- Velocity Profiles: ramping, triangular, trapezoidal, and more complex combined motion profiles are available to the user.
- Positioning Mode: positioning with high resolution including limit switches and zero referencing.
- Additional Modes: for example, Stepper Motor Mode, to synchronize multiple motors.
- Torque Controlling: achieved through current limiting.
- Saving and Running Program Sequences: for stand-alone positioning applications and to relieve the host PC.

Modern Technology in Miniature Format:

- High efficiency
- Amplifier with high range PWM frequencies
- Power MOSFETS with low input resistance
- Unique temperature supervision of the power MOSFETS
- Powerful 16-bit micro controller
- RS232 Interface
- On-board memory (EEPROM)

Inputs and Outputs:

- Command Value Input: for inputting command speed values in digital or analog form. This input can also interpret a reference mark signal. Depending on the mode, a frequency signal or an incremental encoder can be connected at this input.
- Fault Output (Open Collector): this output can also be programmed as a direction of rotation input, a digital input, or a reference mark input.
- RS232 Interface: for connecting a host PC and controlling program sequences.
- An additional digital input.
- The inputs are suitable for controlling program sequences.

Specifications subject to change without notice

Programming

A complete ASCII command set is available for programming and operating the motion controllers. All that is necessary is a terminal program such as the 'hyperterminal' provided with the Windows operating system. The Faulhaber Motion Manager program is available for users of Windows 95/98/ME and NT, 2000, XP. This program makes configuration and operation easy and allows the user to perform an online graphic analysis of the performance of the drive.

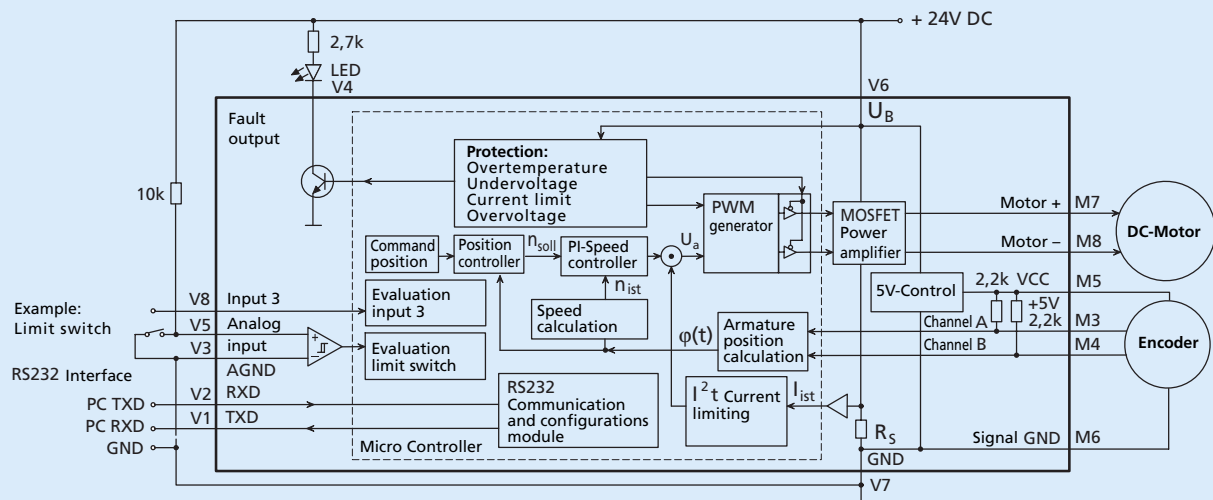
Additional Modes

- Stepper Motor Mode
- Analog Voltage Positioning Mode
- Voltage Regulator Mode
- IR Compensation

Options

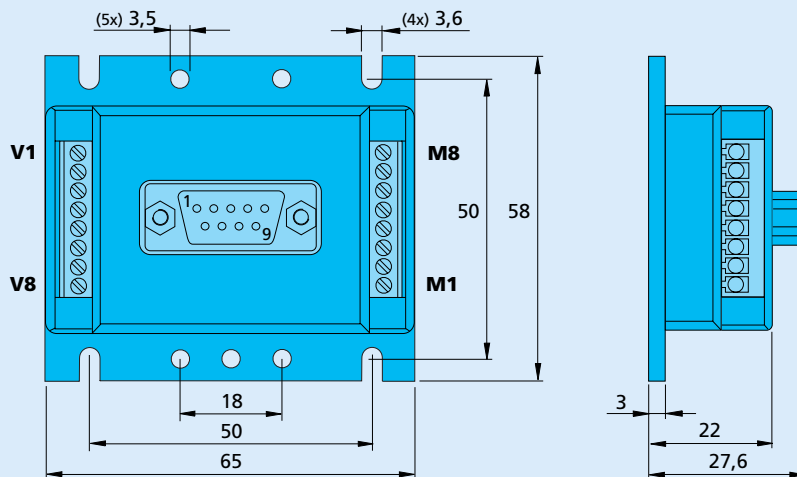
- Faulhaber offers the optional Multiplexer Board to operate multiple motion controllers from one host PC.
- To accommodate our customers specialized needs Faulhaber offers factory preconfiguring of modes and parameters to fit the application.
- Adapter for IE2 – xx Encoder
- Adapter for HEDL Encoder
- The Faulhaber Motion Manager is available for download from the internet at www.faulhaber.com or upon request.

Position control



Dimensional drawing and connection information

Scale reduced



Motor connection

Nr.	Function
M1	Input Nr. 5
M2	Input Nr. 4
M3	Channel A
M4	Channel B
M5	VCC (+5V)
M6	Signal GND
M7	Motor +
M8	Motor -

Supply connection

Nr.	Function
V1	RS232 TXD
V2	RS232 RXD
V3	Analog GND
V4	Fault output
V5	Analog input
V6	+ 24V
V7	GND
V8	Input 3

Specifications subject to change without notice

Switch Mode Power Supply S82J (10/25/50/100/150/300/600-W Models)

CSM_S82J_DS_E_3_1

Low-cost Global Power Supply with CE Marking

- Safety standards:
UL: UL508 (Class 2), No.60950-1,
cUL: CSA C22.2 No. 14 (Class 2), cUR: 60950-1,
EN50178 (= VDE0160)
EMC: Conforms to EN61204-3 Class A
- Mounting bracket available for standard models
Front-mounting bracket type
DIN Rail mounting type (except 300 W and 600 W)
- RoHS-compliant

⚠ Refer to *Safety Precautions for All Power Supplies*.



Model Number Structure

■ Model Number Legend

Note: Not all combinations are possible. Refer to *List of Models* in *Ordering Information* on page 2 and 3.

S82J -

1	2	3	4			

1. Power Ratings

010: 10 W
025: 25 W
050: 50 W
100: 100 W
150: 150 W
300: 300 W
600: 600 W

2. Output Voltage

05: 5 V
12: 12 V
15: 15 V
24: 24 V

3. Configuration

10-/25-/50-/100-/150-W models
A: Open-frame type, front terminals
D: Covered type, front terminals

Mounting bracket
None: With mounting bracket
N: Without mounting bracket

4. Mounting Bracket

None: Front-mounting bracket type
D: DIN Rail mounting bracket type

Ordering Information

List of Models

Note: For details on normal stock models, contact your nearest OMRON representative.

Front-mounting Bracket Models

Configuration	Input Voltage	Power ratings	Output voltage	Output current	Front-mounting bracket models (Front terminals)
Open-frame type	100 to 240 VAC (free)	10 W	5 V	2 A	S82J-01005A
			12 V	1 A	S82J-01012A
			15 V	0.7 A	S82J-01015A
			24 V	0.5 A	S82J-01024A
		25 W	5 V	5 A	S82J-02505A
			12 V	2.1 A	S82J-02512A
			15 V	1.7 A	S82J-02515A
			24 V	1.1 A	S82J-02524A
		50 W	5 V	10 A	S82J-05005A
			12 V	4.2 A	S82J-05012A
			24 V	2.1 A	S82J-05024A
			100 or 200 VAC (selected automatically)	100 W	5 V
	12 V	8.5 A			S82J-10012A
	15 V	7 A			S82J-10015A
	100 to 240 VAC (free)			24 V	4.5 A
	100 or 200 VAC (selected automatically)	150 W	24 V	6.5 A	S82J-15024A
Covered type	100 to 240 VAC (free)	10 W	5 V	2 A	S82J-01005D
			12 V	1 A	S82J-01012D
			15 V	0.7 A	S82J-01015D
			24 V	0.5 A	S82J-01024D
		25 W	5 V	5 A	S82J-02505D
			12 V	2.1 A	S82J-02512D
			15 V	1.7 A	S82J-02515D
			24 V	1.1 A	S82J-02524D
		50 W	5 V	10 A	S82J-05005D
			12 V	4.2 A	S82J-05012D
			24 V	2.1 A	S82J-05024D
			100 or 200 VAC (selected automatically)	100 W	5 V
	12 V	8.5 A			S82J-10012D
	15 V	7 A			S82J-10015D
	100 to 240 VAC (free)			24 V	4.5 A
	100 or 200 VAC (selected automatically)	150 W	24 V	6.5 A	S82J-15024D
	100 or 200 VAC (selectable)	300 W	24 V	14 A	S82J-30024
					S82J-30024N
		600 W		27 A	S82J-60024
					S82J-60024N

DIN Rail Mounting Bracket Models

Configuration	Input Voltage	Power ratings	Output voltage	Output current	DIN Rail mounting bracket models (Front terminals)
Open-frame type	100 to 240 VAC (free)	10 W	5 V	2 A	S82J-01005AD
			12 V	1 A	S82J-01012AD
			15 V	0.7 A	S82J-01015AD
			24 V	0.5 A	S82J-01024AD
		25 W	5 V	5 A	S82J-02505AD
			12 V	2.1 A	S82J-02512AD
			15 V	1.7 A	S82J-02515AD
			24 V	1.1 A	S82J-02524AD
		50 W	5 V	10 A	S82J-05005AD
			12 V	4.2 A	S82J-05012AD
			24 V	2.1 A	S82J-05024AD
			100 or 200 VAC (selected automatically)	100 W	5 V
	12 V	8.5 A			S82J-10012AD
	15 V	7 A			S82J-10015AD
	100 to 240 VAC (free)		24 V	4.5 A	S82J-10024AD
	100 or 200 VAC (selected automatically)	150 W	24 V	6.5 A	S82J-15024AD
Covered type	100 to 240 VAC (free)	10 W	5 V	2 A	S82J-01005DD
			12 V	1 A	S82J-01012DD
			15 V	0.7 A	S82J-01015DD
			24 V	0.5 A	S82J-01024DD
		25 W	5 V	5 A	S82J-02505DD
			12 V	2.1 A	S82J-02512DD
			15 V	1.7 A	S82J-02515DD
			24 V	1.1 A	S82J-02524DD
		50 W	5 V	10 A	S82J-05005DD
			12 V	4.2 A	S82J-05012DD
			24 V	2.1 A	S82J-05024DD
			100 or 200 VAC (selected automatically)	100 W	5 V
	12 V	8.5 A			S82J-10012DD
	15 V	7 A			S82J-10015DD
	100 to 240 VAC (free)		24 V	4.5 A	S82J-10024DD
	100 or 200 VAC (selected automatically)	150 W	24 V	6.5 A	S82J-15024DD

■ Accessories (Order Separately)

Front Mounting Bracket (for the S82J-10024A and S82J-10024D)

S82Y-J10F

Replacement Fan

S82Y-JFAN

Specifications

■ Ratings/Characteristics

Power ratings (See note 1.)		100 to 240 V (Free)				100/200 (Selected automatically)		100/200 (Selected)		
		10 W	25 W	50 W	100 W (24 V)	100 W (5 V, 12 V, 15 V)	150 W	300 W	600 W	
Efficiency (typical)		67% min. (Varies depending on specifications)			83% min.	75% min.	82% min.			
Input	Voltage (See note 2.)	100 to 240 VAC (85 to 264 VAC)				100 VAC (85 to 132 VAC)		100 VAC (85 to 132 VAC)		
		110 to 170 VDC (10-W and 25-W models only) (See note 11.)				200 VAC (170 to 264 VAC) (selected automatically)		200 VAC (170 to 253 VAC) (selectable)		
	Frequency (See note 2.)	50/60 Hz (47 to 450 Hz)								
	Current (See note 3.)	100-V input	0.35 A max.	0.8 max.	1.4 A max.	2.5 A max.	2.5 A max.	3.5 A max.	8 A max.	14 A max.
		200-V input	0.3 A max.	0.6 A max.	0.8 A max.	1.5 A max.	1.4 A max.	2.1 A max.	4 A max.	7 A max.
	Leakage current (See note 3.)	100-V input	0.5 mA max.							
		200-V input	1 mA max.							
	Inrush current (See note 3.)	100-V input	25 A max. (for a cold start at 25°)							30 A max. (for a cold start at 25°)
		200-V input	50 A max. (for a cold start at 25°)							60 A max. (for a cold start at 25°)
Noise filter		Yes								
Output (See note 4.)	Voltage Adjustment Range (See note 5.)	±10% (with V. ADJ)								
	Ripple (See note 3.)	2% (p-p) max.								
	Input variation influence	0.4% max.								
	Load variation influence	0.8% max. (10% to 100% load, rated input voltage)								
	Temperature variation influence	0.05%/°C max. (at rated input and output)								
	Startup time	500 ms max. (up to 90% of output voltage at rated input and output)						300 ms max. (up to 90% of output voltage at rated input and output)		
	Hold time (See note 3.)	20 ms min.								
Additional functions	Overload protection (See note 6.)	105% to 160% of rated load current, voltage/current drop, intermittent operation (10-W and 25-W models) gradual current increase/ voltage drop, intermittent operation (50-W, 100-W (24 V) models), automatic reset						105% of rated load current, Inverted L voltage drop, automatic reset (For the 600-W model, the circuit will be shut OFF when the overload exceeds 5 s.)		
	Overvoltage protection	No			Yes (See note 7.)	Yes (5-V output only) (See note 7.)	No	Yes (See note 8.)		
	Overheat protection	No						Yes (See note 8.)		
	Parallel operation	No						Yes (up to 5 units)		
	Protection-ON alarm indicator	No						Yes (color: red)		
Other	Ambient operating temperature	Refer to the derating curve in <i>Engineering Data</i> . (with no icing or condensation)								
	Storage temperature	–25 to 65°C (with no icing or condensation)								
	Ambient operating humidity	25% to 85% (Storage humidity: 25% to 90%)								
	Dielectric strength	3.0 k VAC for 1 min. (between all inputs and all outputs) 2.2 k VAC for 1 min. (between all inputs and all outputs/PE terminals) 1.0 k VAC for 1 min. (between all outputs and PE terminal)								
	Insulation resistance	100 MΩ min. (between all outputs and all inputs/ PE terminals) at 500 VDC								
	Vibration resistance	10 to 55 Hz, 0.375-mm single amplitude for 2h each in X, Y, and Z directions								
	Shock resistance	300m/s², 3 times each in ±X, ±Y, ±Z directions								
	Output indicator	Yes (color: green)								
	EMI	Conducted Emissions (See note 3.)	Conforms to EN61204-3 EN55011 Class A and based on FCC Class A							
		Radiated Emissions	Conforms to EN61204-3 EN55011 Class A (See note 9.)							
	EMS		Conforms to EN61204-3 Low severity levels							
	Approved standards		UL: UL508 (Listing; Class 2: Per UL1310 Class 2 approved for 10-W, 25-W (except for 5-V output)), and 50-W (only for 24-V output) models.), UL60950-1 cUL: CSA C22.2 No.14 (Class 2 approved for 10-W, 25-W (except for 5-V output), and 50-W (only for 24-V output) models.) cUR: CSA No. 60950-1 EN/VDE: EN50178 (=VDE0160) Terminal types (only terminal part): VDE0106/P100 Based on VE0106/P100				Models with Terminals UL: UL508 (Listing), UL1012, UL60950-1 cUL: CSA C22.2 No. 14 (Listing) cUR: CSA No. 60950-1 EN/VDE: EN50178 (=VDE0160) Terminal types (only terminal part): VDE0106/P100 Based on VE0106/P100 Models with Connectors UL: UL508, UL1012, UL60950-1 CSA: CSA C22.2 No.14 CSA No. 60950-1 EN/VDE: EN50178 (=VDE0160)		UL: UL508, UL1012 CSA: EB1402C, C22.2 No. 14 EN/VDE: EN50178 (=VDE0160) Terminal types (only terminal part): VDE0106/P100 Based on VE0106/P100	
	Weight (See note 10.)		250 g max.	350 g max.	400 g max.	500 g max.	1,000 g max.		2,000 g max.	2,500 g max.

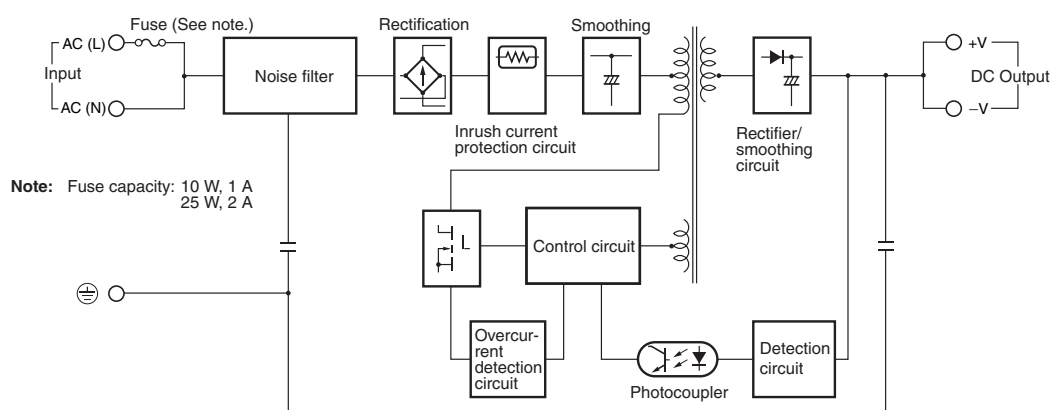
- Note:** 1. When a load is connected that has a built-in DC-DC converter, the overload protection may operate at startup and the power supply may not start. Be sure to select a Power Supply with sufficient capacity. Refer to *Overload Protection* on page 10 for details.
2. Do not use the Inverter output for the Power Supply. Inverters with an output frequency of 50/60 Hz are available, but the rise in the internal temperature of the Power Supply may result in ignition or burning.
3. Defined with a 100% load and the rated input voltage (100 or 200 VAC.)
4. The output specification is defined at the power output terminals.
5. If the output voltage adjuster (V. ADJ) is turned, the voltage will increase by more than +10% of the voltage adjustment range. When adjusting the output voltage, confirm the actual output voltage from the Power Supply and be sure that the load is not damaged.
6. Refer to *Overload Protection* on page 10 for details.
7. For resetting, turn OFF the power, leave for more than one minute, and then turn it ON again.
8. The protection-ON alarm indicator will light as soon as the output is interrupted. For resetting, turn OFF the input power, leave for more than three minutes (90 seconds min. for the 300-W models), and then turn it back ON again.
9. Radiated emissions: The noise value is affected by factors such as the wiring method. For 300-W and 600-W models, use shielded wire for all wiring, and insert one noise clamp filter (TDK, ZCAT3035-1330) on the input wire, and two noise clamp filters on the load wire.
10. The weight indicated is the weight of the open-frame type. (Includes the covers for 300-W and 600-W models)

Connections

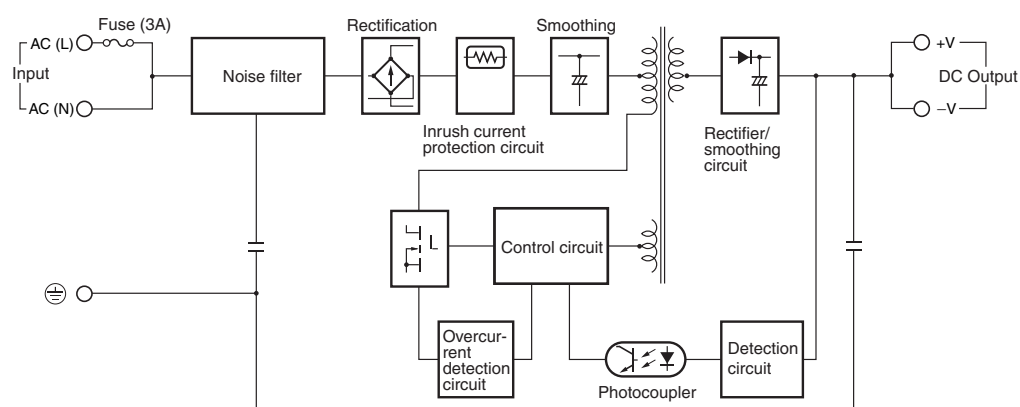
■ Block Diagrams

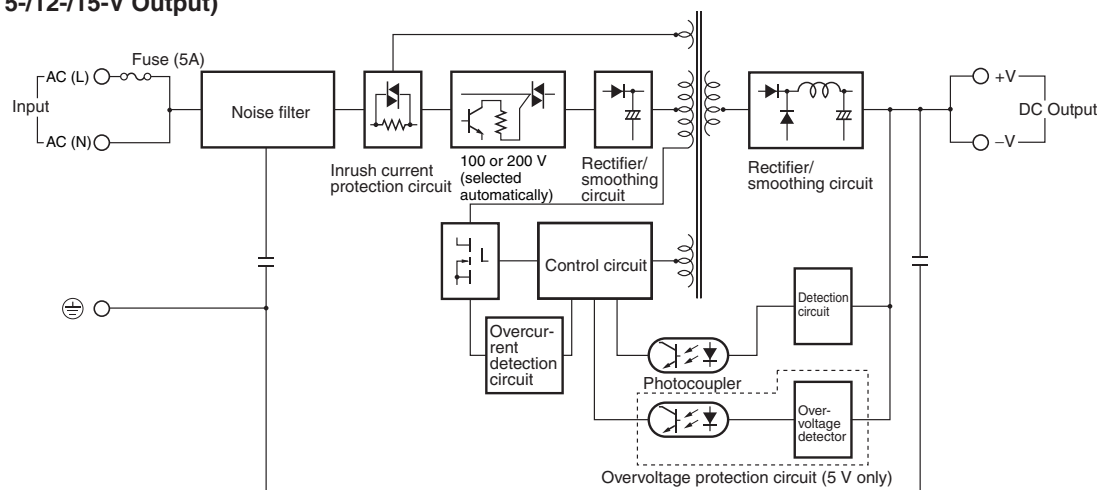
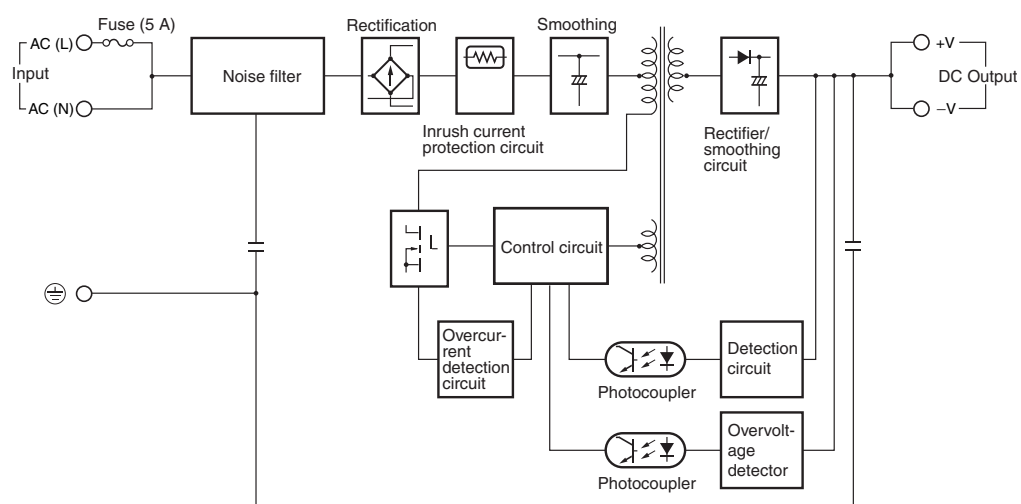
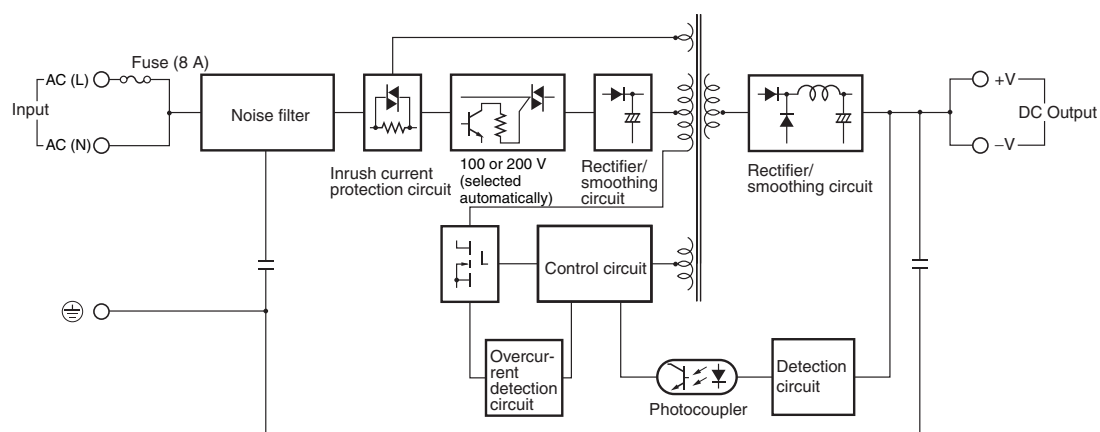
S82J-010□□□□ (10 W)

S82J-025□□□□ (25 W)

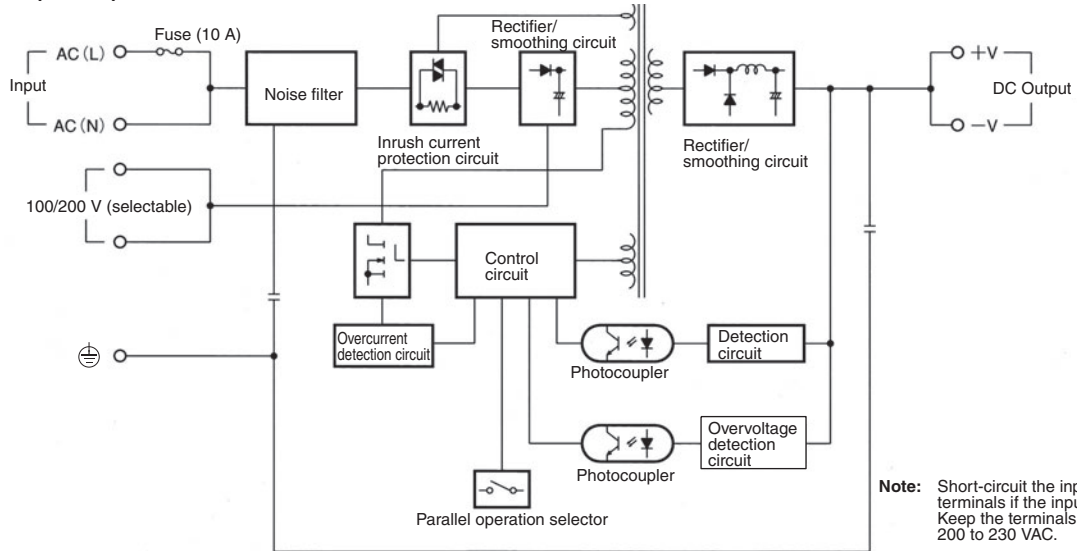


S82J-050□□□□ (50 W)



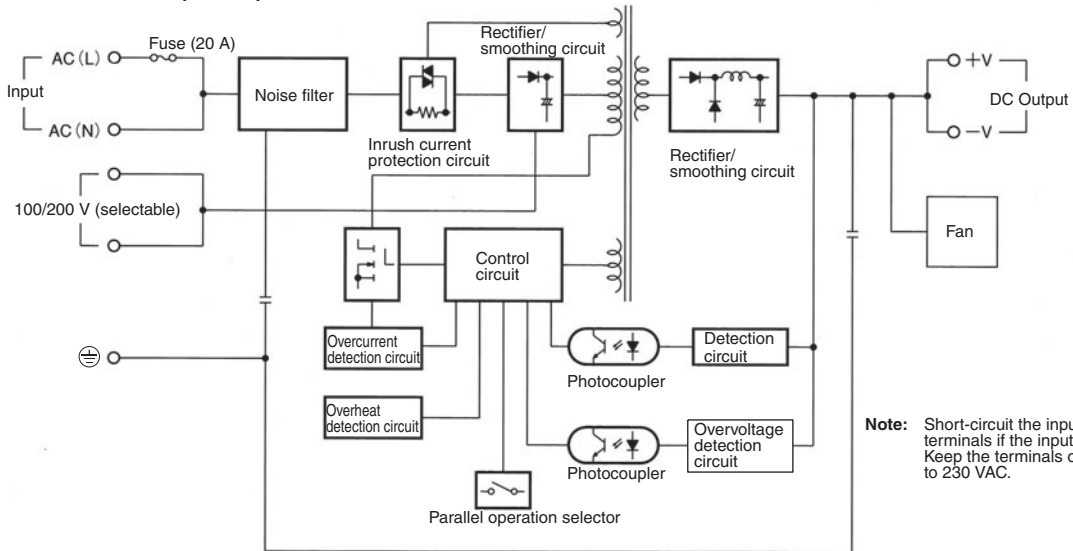
S82J-100□□□□**(100 W, 5-/12-/15-V Output)****S82J-10024**□□ (100 W, 24-V Output)**S82J-15024**□□ (150 W)

S82J-30024□ (300 W)



Note: Short-circuit the input voltage selector terminals if the input is 100 to 120 VAC. Keep the terminals open if the input is 200 to 230 VAC.

S82J-60024□ (600 W)

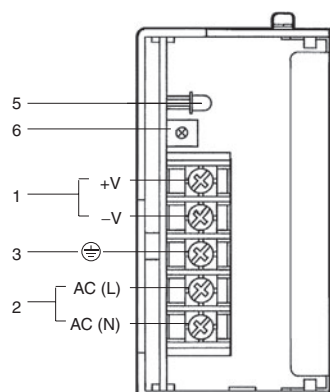


Note: Short-circuit the input voltage selector terminals if the input is 100 to 120 VAC. Keep the terminals open if the input is 200 to 230 VAC.

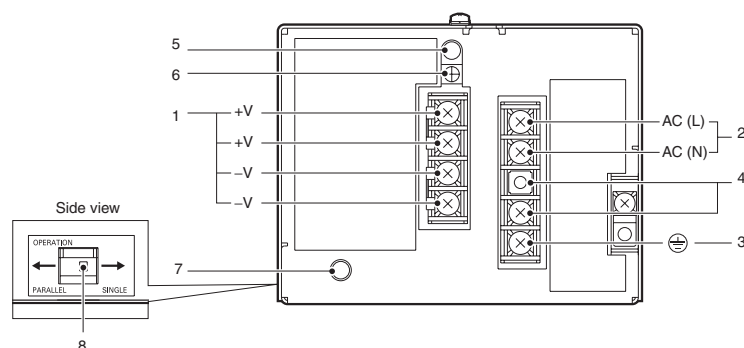
Construction and Nomenclature

■ Nomenclature

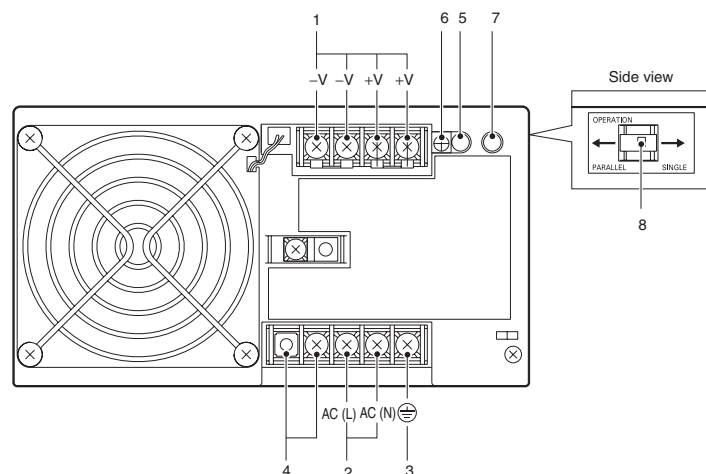
10-/25-/50-/100-/150-W Models



300-W Models



600-W Models



1. DC Output Terminals (+V), (-V): Connect the load lines to these terminals.

2. AC Input Terminals (L), (N): Connect the input lines to these terminals.

Note: 1. The fuse is located on the (L) side. It is NOT user replaceable.

2. For DC input (10-W, 25-W models), use the (L) terminal as the positive terminal.

3. Protective Earthing Terminal (⊕): Connect the ground line to this terminal.

4. Input Voltage Selector Terminals: Short-circuit the terminals if the input is 100 to 120 VAC and open the terminals if the input is 200 to 230 VAC

5. Output Indicator (DC ON: Green): Lights while a Direct Current (DC) output is ON.

6. Output Voltage Adjuster (V.ADJ): It is possible to increase or decrease the output voltage by 10%.

7. Protection-ON Alarm Indicator (DC ON: Red): The red indicator will be lit if the overvoltage (for a 300-/600-W model) or overheat protection (for a 600-W model) circuit is triggered. This indicator will also be lit when overload (for a 600-W model) is detected.

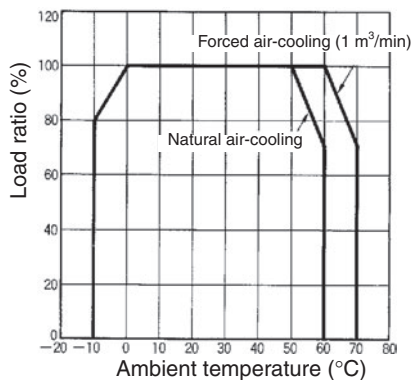
8. Selector of Parallel Operation: Set the selector to PARALLEL if the Units are in parallel operation.

Engineering Data

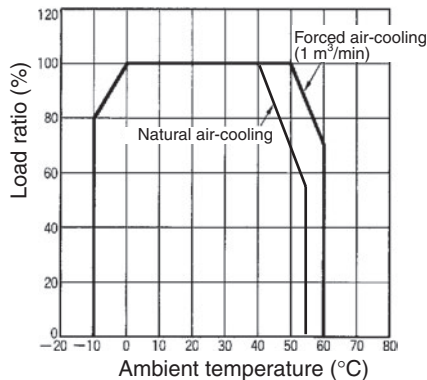
Derating Curve (for Standard Mounting)

10-/25-/50-/100-/150-W Model

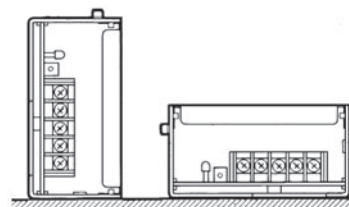
Open-frame Type



Covered Type



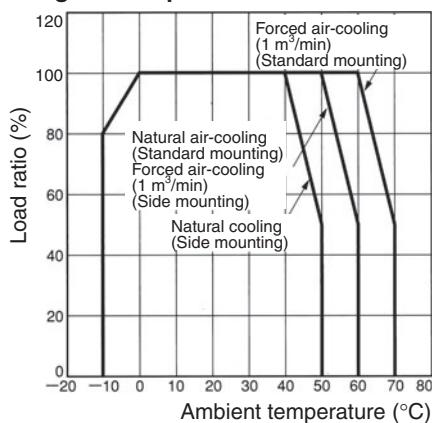
Standard Mounting



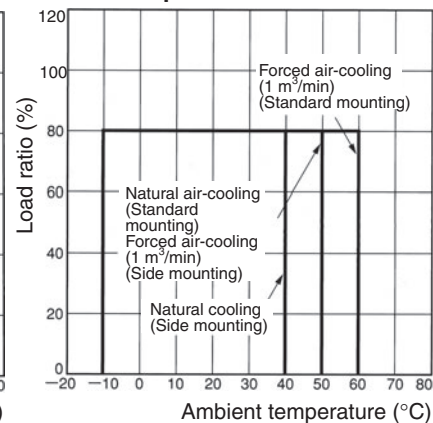
Note: The derating curve shown is for standard mounting. The derating curve depends on the mounting direction of the Power Supply.

300-W Model

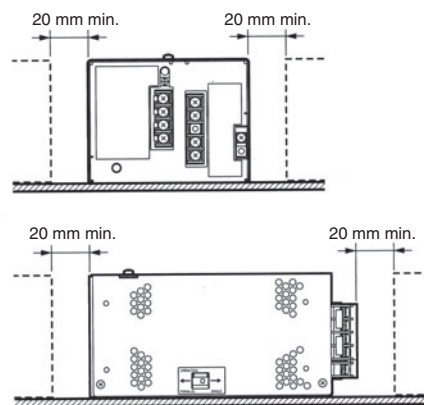
Single-unit Operation



Parallel Operation



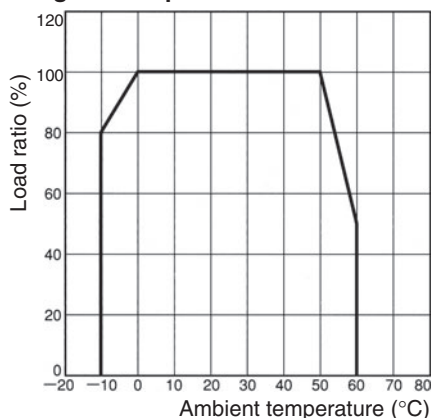
Standard Mounting



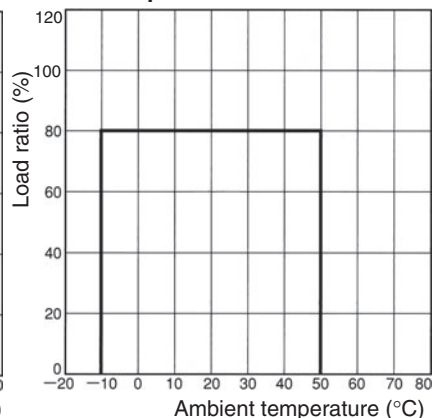
Note: Provide a minimum clearance of 20 mm between the Power Supplies.

600-W Model

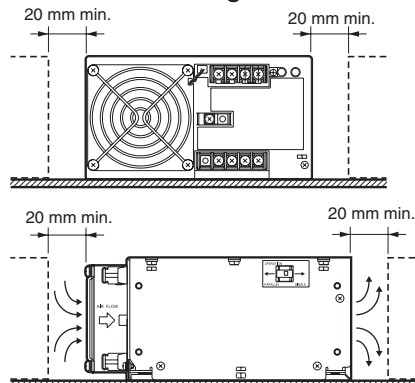
Single-unit Operation



Parallel Operation



Standard Mounting



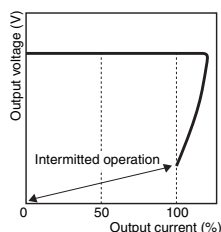
Note: Provide a minimum clearance of 20 mm between the Power Supplies.

■ Overload Protection

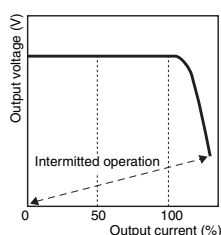
10- to 300-W Models

The Power Supply is provided with an overload protection function that protects the Power Supply from possible damage by overcurrent. When the output current rises above 105% to 160% of the rated output current, the protection function is triggered, automatically decreasing the output voltage. When the output current falls within the rated range, the overload protection function is automatically cleared.

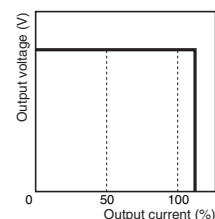
10 W, 25 W Models



50 W, 100 W (24-V) Models



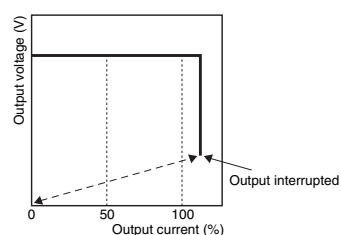
100 W (5-V, 12-V, 15-V), 150 W, 300 W Models



The values shown in the above diagrams are for reference only.

- Note:**
1. If the S82J is connected to a load with a built-in DC-DC converter, the overload protection function may be triggered at startup, and consequently the S82J may not operate.
 2. Internal parts may occasionally deteriorate or be damaged if a short-circuited or other overcurrent state continues during operation. Eliminate the overcurrent state as soon as possible.
 3. In actual operation, the output voltage may not fall to 0 V when the overload protection function is triggered. Even with short-circuits on the load side, the drop in voltage will vary depending on factors such as the impedance in the load line.
 4. The overload protection function is specified at 105% or more of the rated output current for 300-W models.

600-W Models



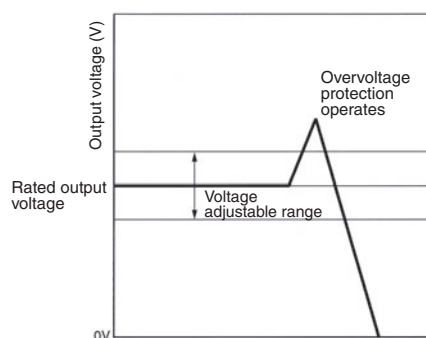
If an excessive current flows for 5 s or more, the output will be turned OFF and simultaneously the protection-ON alarm indicator will be lit. To reset the S82J, turn OFF the power, leave the S82J for at least three minutes, and then turn it ON again.

Note: Internal parts may occasionally deteriorate or be damaged if a short-circuited state continues during operation. Eliminate the overcurrent state as soon as possible.

■ Overvoltage Protection

100-W (5-, 24-V Output) Models

Consider the possibility of an overvoltage and design the system so that the load will not be subjected to an excessive voltage even if the feedback circuit in the Power Supply fails. When an excessive voltage that is approximately 120% of the rated voltage or more is output, the output voltage is shut OFF, preventing damage to the load due to overvoltage. Reset the input power by turning it OFF for at least one minute and then turning it back ON again.



The values shown in the above diagram are for reference only.

300- and 600-W Models

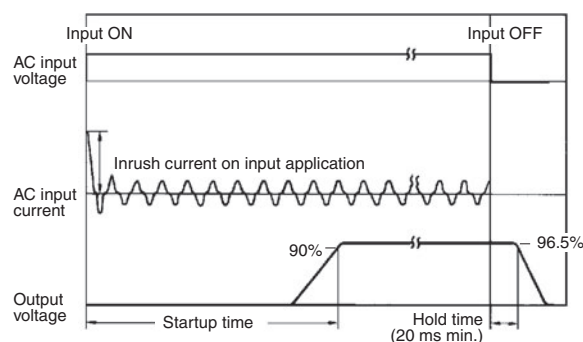
When an excessive voltage that is approximately 120% of the rated voltage or more is output, the output voltage will be turned OFF and simultaneously the protection-ON alarm indicator will be lit. Reset the input power by turning it OFF for at least three minutes (90 seconds for 300-W models) and then turning it back ON again.

■ Overheat Protection Function

600-W Models Only

If the internal temperature rises excessively as a result of fan failure or any other reason, the overheat protection circuit will be triggered to protect the internal parts and simultaneously the protection-ON alarm indicator will be lit. Reset the input power by turning it OFF for at least three minutes and then turning it back ON again.

■ Inrush Current, Startup Time, Hold Time



Note: Models with a 100 to 240 V (free) input have a higher inrush current energy than models with a single rated input voltage or models with a switchable input voltage. Be sure to coordinate breaker with the inrush current energy.

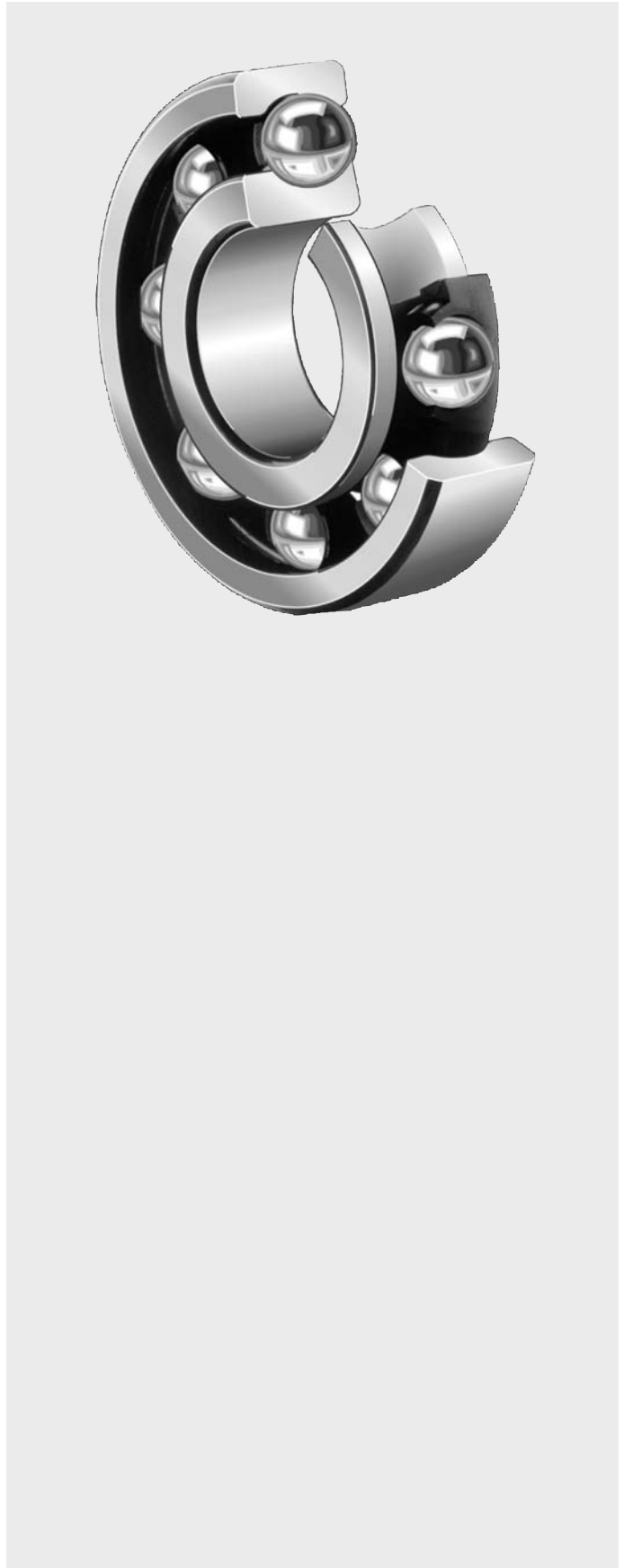


Preisliste 2012-02


Price List · Tarif · Lista de precios
Listino prezzi · Prijslijst · Prislista
Prisliste · Hinnasto · Lista de preços
Cennik · Ceník · Cenník · Árlista
Ценова листа · Fiyat Listesi
Прайс-лист

SCHAEFFLER


- Ⓓ Rillenkugellager
- ⒼⒷ Deep groove ball bearings
- Ⓕ Roulements à billes
- Ⓔ Rodamientos rígidos a bolas
- Ⓘ Cuscinetti a sfera
- ⓃⓁ Groefkogellagers
- Ⓢ Spårkullager
- ⒹⓀ Sporkuglelejer
- ⒻⓂ Urakuulalaakerit
- Ⓟ Rolamentos rígidos de esferas
- Ⓝ Sporkulelager
- Ⓟ Łożyska kulkowe zwykłe
- ⒸⓏ Kuličková ložiska
- ⓈⓀ Gullové ložiská
- Ⓗ Mélyhornyú golyóscsapágy
- ⒷⒼ Радиални сачмени лагери
- ⓉⓇ Bilyalı rulmanlar
- ⓇⓊⓈ Шарикоподшипники
радиальные




- (D) Rillenkugellager, einreihig
 (GB) Deep groove ball bearings, single row
 (F) Roulements à une rangée de billes
 (E) Rodamientos rígidos a bolas, de una hilera
 (I) Cuscinetti a sfera ad una corona
 (NL) Eenrijige groefkogellagers
 (S) Spårkullager, enradiga
 (DK) Sporkuglelejer, enradede
 (FIN) Urakuulalaakerit, yksiriviset
 (P) Rolamentos rígidos de esferas, de uma fila
 (N) Sporkulelager, enradig
 (PL) Łożyska kulkowe zwykłe
 (CZ) Kuličková ložiska, jednořadá
 (SK) Gulčkové ložiská, jednoradové
 (H) Mélyhornyú golyóscsapágy
 (BG) Едноредни сачмени лагери
 (TR) Bilyalı rulmanlar, tek sıra
 (RUS) Шарикоподшипники радиальные однорядные

FAG	Euro	≈kg	d mm	D mm	B mm	 min
629-2RSR	9,78	0,021	9	26	8	10
634	8,96	0,006	4	16	5	10
634-2Z	11,07	0,006	4	16	5	10
635	8,55	0,008	5	19	6	10
635-2Z	9,36	0,008	5	19	6	10
6000-C	7,71	0,019	10	26	8	1
6000-C-2Z	8,85	0,02	10	26	8	1
6000-C-2HRS	10,05	0,02	10	26	8	1
6001-C	8,27	0,02	12	28	8	1
6001-C-2Z	9,56	0,02	12	28	8	1
6001-C-2HRS	10,79	0,022	12	28	8	1
6002-C	9,06	0,031	15	32	9	1
6002-C-2Z	10,46	0,033	15	32	9	1
6002-C-2HRS	11,84	0,033	15	32	9	1
6004-C	10,62	0,069	20	42	12	1
6004-C-2Z	12,21	0,071	20	42	12	1
6004-C-2HRS	13,81	0,071	20	42	12	1
6003	9,57	0,038	17	35	10	1
6003-2Z	11,04	0,04	17	35	10	1
6003-2RSR	12,43	0,04	17	35	10	1
6005	12,18	0,081	25	47	12	1
6005-2Z	14,01	0,083	25	47	12	1
6005-2RSR	15,87	0,085	25	47	12	1
6006	14,96	0,122	30	55	13	1
6006-2Z	17,21	0,126	30	55	13	1
6006-2RSR	19,44	0,126	30	55	13	1
6007	18,54	0,157	35	62	14	1
6007-2Z	21,35	0,163	35	62	14	1
6007-2RSR	24,05	0,163	35	62	14	1
6008	23,25	0,194	40	68	15	1
6008-2Z	26,80	0,2	40	68	15	1
6008-2RSR	30,35	0,202	40	68	15	1
6009	30,30	0,247	45	75	16	1
6009-2Z	34,75	0,253	45	75	16	1
6009-2RSR	39,30	0,257	45	75	16	1
6010	35,05	0,272	50	80	16	1
6010-2Z	40,30	0,282	50	80	16	1
6010-2RSR	45,60	0,283	50	80	16	1
6011	44,85	0,397	55	90	18	1
6011-2Z	51,50	0,409	55	90	18	1
6011-2RSR	58,20	0,41	55	90	18	1
6012	51,40	0,419	60	95	18	1
6012-2Z	59,10	0,431	60	95	18	1
6012-2RSR	66,80	0,432	60	95	18	1
6013	65,50	0,448	65	100	18	1
6013-2Z	75,50	0,464	65	100	18	1
6013-2RSR	83,00	0,463	65	100	18	1
6014	83,30	0,622	70	110	20	1
6014-2Z	95,90	0,642	70	110	20	1
6014-2RSR	105,00	0,64	70	110	20	1

- (D) Rillenkugellager, einreihig
 (GB) Deep groove ball bearings, single row
 (F) Roulements à une rangée de billes
 (E) Rodamientos rígidos a bolas, de una hilera
 (I) Cuscinetti a sfera ad una corona
 (NL) Eenrijige groefkogellagers
 (S) Spårkullager, enradiga
 (DK) Sporkuglelejer, enradede
 (FIN) Urakuulalaakerit, yksiriviset
 (P) Rolamentos rígidos de esferas, de uma fila
 (N) Sporkulelager, enradig
 (PL) Łożyska kulkowe zwykłe
 (CZ) Kuličková ložiska, jednořadá
 (SK) Guľkové ložiská, jednoradové
 (H) Mélyhornyú golyócsapágy
 (BG) Едноредни сачмени лагери
 (TR) Bilyalı rulmanlar, tek sıra
 (RUS) Шарикоподшипники радиальные однорядные

FAG	Euro	≈kg	d mm	D mm	B mm	min 
6015	95,60	0,654	75	115	20	1
6015-2Z	109,50	0,676	75	115	20	1
6015-2RSR	120,00	0,678	75	115	20	1
6016	116,00	0,845	80	125	22	1
6016-2Z	134,00	0,893	80	125	22	1
6016-2RSR	146,00	0,85	80	125	22	1
6017	130,00	0,917	85	130	22	1
6017-2Z	149,50	0,94	85	130	22	1
6017-2RSR	169,00	0,942	85	130	22	1
6018	154,50	1,21	90	140	24	1
6018-2Z	178,00	1,23	90	140	24	1
6018-2RSR	201,50	1,23	90	140	24	1
6019	184,50	1,27	95	145	24	1
6020	198,00	1,32	100	150	24	1
6020-2Z	227,00	1,35	100	150	24	1
6020-2RSR	249,50	1,35	100	150	24	1
6021	240,50	1,67	105	160	26	1
6021-2Z	292,00	1,7	105	160	26	1
6022	289,50	2,06	110	170	28	1
6022-2Z	350,50	2,11	110	170	28	1
6024	335,50	2,18	120	180	28	1
6024-2Z	408,50	2,23	120	180	28	1
6024-2RSR	436,00	2,24	120	180	28	1
6026	434,50	3,42	130	200	33	1
6028	515,00	3,57	140	210	33	1
6030	635,00	4,32	150	225	35	1
6032-M	1 125,00	6,16	160	240	38	1
6036-M	1 520,00	10,6	180	280	46	1
6038-M	1 757,00	11,3	190	290	46	1
6040-M	2 028,00	14,4	200	310	51	1
6044-M	2 780,00	18,8	220	340	56	1
6200-C	7,72	0,031	10	30	9	1
6200-C-2Z	8,89	0,032	10	30	9	1
6200-C-2HRS	10,06	0,034	10	30	9	1
6201-C	8,07	0,037	12	32	10	1
6201-C-2Z	9,30	0,039	12	32	10	1
6201-C-2HRS	10,49	0,039	12	32	10	1
6202-C	8,68	0,043	15	35	11	1
6202-C-2Z	10,00	0,045	15	35	11	1
6202-C-2HRS	11,31	0,045	15	35	11	1
6203-C	9,80	0,065	17	40	12	1
6203-C-2Z	11,21	0,067	17	40	12	1
6203-C-2HRS	12,72	0,067	17	40	12	1
6204-C	11,50	0,106	20	47	14	1
6204-C-2Z	13,11	0,11	20	47	14	1
6204-C-2HRS	14,95	0,11	20	47	14	1
6205-C	13,37	0,129	25	52	15	1
6205-C-2Z	15,41	0,133	25	52	15	1
6205-C-2HRS	17,46	0,133	25	52	15	1
6206	17,93	0,195	30	62	16	1

- (D) Rillenkugellager, einreihig
 (GB) Deep groove ball bearings, single row
 (F) Roulements à une rangée de billes
 (E) Rodamientos rígidos a bolas, de una hilera
 (I) Cuscinetti a sfera ad una corona
 (NL) Eenrijige groefkogellagers
 (S) Spårkullager, enradiga
 (DK) Sporkuglelejer, enradede
 (FIN) Urakuulalaakerit, yksiriviset
 (P) Rolamentos rígidos de esferas, de uma fila
 (N) Sporkulelager, enradig
 (PL) Łożyska kulkowe zwykłe
 (CZ) Kuličková ložiska, jednořadá
 (SK) Gulťové ložiská, jednoradové
 (H) Mélyhornyú golyóscsapágy
 (BG) Едноредни сачмени лагери
 (TR) Bilyalı rulmanlar, tek sıra
 (RUS) Шарикоподшипники радиальные однорядные

FAG	Euro	≈kg	d mm	D mm	B mm	 min
6206-2Z	20,65	0,201	30	62	16	1
6206-2RSR	23,25	0,201	30	62	16	1
6207	23,55	0,291	35	72	17	1
6207-2Z	27,15	0,299	35	72	17	1
6207-2RSR	30,65	0,301	35	72	17	1
6208	31,30	0,372	40	80	18	1
6208-2Z	36,00	0,382	40	80	18	1
6208-2RSR	40,70	0,384	40	80	18	1
6209	38,25	0,429	45	85	19	1
6209-2Z	43,95	0,441	45	85	19	1
6209-2RSR	49,65	0,441	45	85	19	1
6210	45,25	0,466	50	90	20	1
6210-2Z	52,00	0,478	50	90	20	1
6210-2RSR	58,80	0,48	50	90	20	1
6211	53,40	0,618	55	100	21	1
6211-2Z	61,50	0,632	55	100	21	1
6211-2RSR	69,50	0,632	55	100	21	1
6212	66,70	0,791	60	110	22	1
6212-2Z	76,40	0,807	60	110	22	1
6212-2RSR	86,40	0,809	60	110	22	1
6213	97,50	1	65	120	23	1
6213-2Z	112,00	1,03	65	120	23	1
6213-2RSR	123,00	1,03	65	120	23	1
6214	108,50	1,09	70	125	24	1
6214-2Z	128,50	1,11	70	125	24	1
6214-2RSR	137,00	1,11	70	125	24	1
6215	128,50	1,19	75	130	25	1
6215-2Z	152,50	1,21	75	130	25	1
6215-2RSR	161,50	1,22	75	130	25	1
6216	150,50	1,46	80	140	26	1
6216-2Z	178,00	1,49	80	140	26	1
6216-2RSR	189,50	1,49	80	140	26	1
6217	188,00	1,87	85	150	28	1
6217-2Z	217,00	1,91	85	150	28	1
6217-2RSR	245,00	1,91	85	150	28	1
6218	232,50	2,21	90	160	30	1
6218-2Z	268,00	2,26	90	160	30	1
6218-2RSR	302,00	2,26	90	160	30	1
6219	280,50	2,73	95	170	32	1
6220	323,00	3,3	100	180	34	1
6220-2Z	370,50	3,36	100	180	34	1
6220-2RSR	419,00	3,36	100	180	34	1
6222	468,00	4,64	110	200	38	1
6224	600,00	5,62	120	215	40	1
6226	716,00	6,24	130	230	40	1
6228	967,00	8,07	140	250	42	1
6301	11,05	0,062	12	37	12	1
6301-2Z	12,08	0,064	12	37	12	1
6301-2RSR	13,68	0,064	12	37	12	1
6302	11,41	0,088	15	42	13	1
6302-2Z	13,14	0,09	15	42	13	1

- Ⓓ Rillenkugellager, einreihig
- ⒼⒹ Deep groove ball bearings, single row
- Ⓕ Roulements à une rangée de billes
- Ⓔ Rodamientos rígidos a bolas, de una hilera
- Ⓘ Cuscinetti a sfera ad una corona
- Ⓐ Eenrijige groefkogellagers
- Ⓒ Spårkullager, enradiga
- ⒹⓀ Sporkuglelejer, enradede
- ⒻⒶ Urakuulalaakerit, yksiriviset
- Ⓖ Rolamentos rígidos de esferas, de uma fila
- Ⓐ Sporkulelager, enradig
- Ⓐ Łożyska kulkowe zwykłe
- Ⓒ Kuličková ložiska, jednořadá
- Ⓒ Gulčkové ložiská, jednoradové
- Ⓕ Mélyhornyú golyócsapágy
- ⒼⒹ Едноредни сачмени лагери
- ⒸⒶ Bilyalı rulmanlar, tek sıra
- Ⓐ Шарикоподшипники радиальные однорядные

FAG	Euro	≈kg	d mm	D mm	B mm	min 
6302-2RSR	14,81	0,09	15	42	13	1
6303	12,89	0,114	17	47	14	1
6303-2Z	14,83	0,117	17	47	14	1
6303-2RSR	16,78	0,118	17	47	14	1
6304	14,95	0,151	20	52	15	1
6304-2Z	17,19	0,155	20	52	15	1
6304-2RSR	19,43	0,155	20	52	15	1
6305	18,72	0,234	25	62	17	1
6305-2Z	21,55	0,24	25	62	17	1
6305-2RSR	24,30	0,242	25	62	17	1
6306	25,30	0,355	30	72	19	1
6306-2Z	29,05	0,363	30	72	19	1
6306-2RSR	32,75	0,365	30	72	19	1
6307	33,90	0,471	35	80	21	1
6307-2Z	39,05	0,481	35	80	21	1
6307-2RSR	44,15	0,483	35	80	21	1
6308	48,10	0,64	40	90	23	1
6308-2Z	55,10	0,654	40	90	23	1
6308-2RSR	62,50	0,654	40	90	23	1
6309	60,70	0,849	45	100	25	1
6309-2Z	69,60	0,869	45	100	25	1
6309-2RSR	78,80	0,867	45	100	25	1
6310	80,40	1,1	50	110	27	1
6310-2Z	92,60	1,12	50	110	27	1
6310-2RSR	104,50	1,12	50	110	27	1
6311	101,00	1,39	55	120	29	1
6311-2Z	115,50	1,43	55	120	29	1
6311-2RSR	130,50	1,43	55	120	29	1
6312	127,50	1,75	60	130	31	1
6312-2Z	147,00	1,79	60	130	31	1
6312-2RSR	166,50	1,79	60	130	31	1
6313	177,00	2,14	65	140	33	1
6313-2Z	203,50	2,18	65	140	33	1
6313-2RSR	223,00	2,18	65	140	33	1
6314	207,00	2,55	70	150	35	1
6314-2Z	245,00	2,6	70	150	35	1
6314-2RSR	269,50	2,6	70	150	35	1
6315	252,00	3,18	75	160	37	1
6315-2Z	298,50	3,23	75	160	37	1
6315-2RSR	327,50	3,22	75	160	37	1
6316	296,50	3,75	80	170	39	1
6316-2Z	352,00	3,82	80	170	39	1
6316-2RSR	408,50	3,82	80	170	39	1
6317	359,50	4,25	85	180	41	1
6317-2Z	425,50	4,33	85	180	41	1
6317-2RSR	526,00	4,33	85	180	41	1
6318	436,50	5,43	90	190	43	1
6319	539,00	6,23	95	200	45	1
6320	649,00	7,67	100	215	47	1
6322	957,00	10,3	110	240	50	1
6324	1 188,00	12,8	120	260	55	1

- (D) Rillenkugellager, einreihig
 (GB) Deep groove ball bearings, single row
 (F) Roulements à une rangée de billes
 (E) Rodamientos rígidos a bolas, de una hilera
 (I) Cuscinetti a sfera ad una corona
 (NL) Eenrijige groefkogellagers
 (S) Spårkullager, enradiga
 (DK) Sporkuglelejer, enradede
 (FIN) Urakuulalaakerit, yksiriviset
 (P) Rolamentos rígidos de esferas, de uma fila
 (N) Sporkulelager, enradig
 (PL) Łożyska kulkowe zwykłe
 (CZ) Kuličková ložiska, jednořadá
 (SK) Gulčkové ložiská, jednoradové
 (H) Mélyhornyú golyóscsapágy
 (BG) Едноредни сачмени лагери
 (TR) Bilyalı rulmanlar, tek sıra
 (RUS) Шарикоподшипники радиальные однорядные

FAG	Euro	≈kg	d mm	D mm	B mm	 min
6405	76,00	0,549	25	80	21	1
6406	93,30	0,74	30	90	23	1
6407	113,00	0,971	35	100	25	1
6408	139,00	0,805	40	110	27	1
6409	170,50	1,98	45	120	29	1
6410	200,50	1,96	50	130	31	1
6411	239,00	1,38	55	140	33	1
6412	287,00	2,83	60	150	35	1
16002-A	14,83	0,025	15	32	8	1
16002-A-2Z	16,07	0,027	15	32	8	1
16003-A	14,49	0,032	17	35	8	1
16003-A-2Z	16,16	0,037	17	35	8	1
16004-A	15,95	0,05	20	42	8	1
16004-A-2Z	18,13	0,051	20	42	8	1
16005-A	17,64	0,056	25	47	8	1
16005-A-2Z	20,20	0,062	25	47	8	1
16006-A	20,70	0,085	30	55	9	1
16006-A-2Z	23,85	0,09	30	55	9	1
16007-A	23,85	0,104	35	62	9	1
16008-A	27,75	0,12	40	68	9	1
16009-A	35,80	0,167	45	75	10	1
16010-A	40,85	0,181	50	80	10	1
16011-A	55,40	0,266	55	90	11	1
16012	63,20	0,283	60	95	11	1
16013	73,50	0,302	65	100	11	1
16014	89,90	0,438	70	110	13	1
16015	100,00	0,463	75	115	13	1
16016	117,00	0,609	80	125	14	1
16017	130,50	0,666	85	130	14	1
16018	146,00	0,866	90	140	16	1
16020	181,50	0,956	100	150	16	1
16022	254,00	1,52	110	170	19	1
16024	296,50	1,62	120	180	19	1
61800	20,60	0,006	10	19	5	1
61800-2Z	23,50	0,006	10	19	5	1
61800-2RSR	23,50	0,006	10	19	5	1
61801	20,15	0,006	12	21	5	1
61801-2Z	23,05	0,006	12	21	5	1
61801-2RSR	23,05	0,006	12	21	5	1
61802	20,15	0,008	15	24	5	1
61802-2Z	23,80	0,008	15	24	5	1
61802-2RSR	23,80	0,008	15	24	5	1
61803	21,75	0,008	17	26	5	1
61803-2Z	27,05	0,008	17	26	5	1
61803-2RSR	27,05	0,008	17	26	5	1
61804	24,50	0,018	20	32	7	1
61804-2Z	30,70	0,018	20	32	7	1
61804-2RSR	30,70	0,018	20	32	7	1
61805	28,30	0,023	25	37	7	1
61805-2Z	35,10	0,023	25	37	7	1


- Ⓓ Rillenkugellager, einreihig
- ⒼⒹ Deep groove ball bearings, single row
- Ⓕ Roulements à une rangée de billes
- Ⓔ Rodamientos rígidos a bolas, de una hilera
- Ⓘ Cuscinetti a sfera ad una corona
- Ⓐ Eenrijige groefkogellagers
- Ⓒ Spårkullager, enradiga
- ⒹⒶ Sporkuglelejer, enradede
- ⒻⒶ Urakuulalaakerit, yksiriviset
- Ⓖ Rolamentos rígidos de esferas, de uma fila
- Ⓐ Sporkulelager, enradig
- Ⓐ Łożyska kulkowe zwykłe
- Ⓒ Kuličková ložiska, jednořadá
- Ⓐ Gulŕkové ložiská, jednoradové
- Ⓕ Mélyhornyú golyócsapágy
- ⒼⒶ Едноредни сачмени лагери
- ⒸⒶ Bilyalı rulmanlar, tek sıra
- ⒶⒶ Шарикоподшипники радиальные однорядные

FAG	Euro	≈kg	d mm	D mm	B mm	
61805-2RSR	35,10	0,023	25	37	7	1
61806	42,85	0,027	30	42	7	1
61806-2Z	50,60	0,027	30	42	7	1
61806-2RSR	50,60	0,027	30	42	7	1
61807	50,60	0,03	35	47	7	1
61807-2Z	58,20	0,03	35	47	7	1
61807-2RSR	58,20	0,03	35	47	7	1
61808	54,00	0,032	40	52	7	1
61808-2Z	63,60	0,032	40	52	7	1
61808-2RSR	63,60	0,032	40	52	7	1
61809-Y	64,70	0,039	45	58	7	1
61809-2Z-Y	83,80	0,039	45	58	7	1
61809-2RS-Y	75,40	39	45	58	7	1
61810-Y	73,60	0,052	50	65	7	1
61810-2Z-Y	95,30	0,052	50	65	7	1
61810-2RS-Y	85,80	52	50	65	7	1
61811-Y	86,50	0,085	55	72	9	1
61811-2Z-Y	115,50	0,084	55	72	9	1
61811-2RSR-Y	104,50	0,084	55	72	9	1
61812-Y	101,50	0,109	60	78	10	1
61812-2Z-Y	126,00	0,105	60	78	10	1
61812-2RSR-Y	119,50	0,105	60	78	10	1
61813-Y	114,00	0,136	65	85	10	1
61813-2Z-Y	166,00	0,13	65	85	10	1
61813-2RS-Y	136,00	0,13	65	85	10	1
61814-Y	122,50	0,138	70	90	10	1
61814-2Z-Y	145,50	0,14	70	90	10	1
61814-2RS-Y	145,50	0,14	70	90	10	1
61815-2RS-Y	166,50	0,15	75	95	10	1
61816-Y	154,00	0,163	80	100	10	1
61817-2RS-Y	226,00	0,27	85	110	13	1
61816-2RSR-Y	184,00	0,155	80	100	10	1
61818-Y	211,50	0,299	90	115	13	1
61818-2RS-Y	260,00	0,28	90	115	13	1
61819-2RSR-Y	271,50	0,295	95	120	13	1
61820-Y	240,50	0,329	100	125	13	1
61820-2RS-Y	295,00	0,31	100	125	13	1
61821-2RS-Y	321,50	0,33	105	130	13	1
61822-Y	289,00	0,525	110	140	16	1
61822-2RS-Y	342,00	0,5	110	140	16	1
61824-Y	338,00	0,563	120	150	16	1
61824-2RS-Y	409,00	0,55	120	150	16	1
61826	406,00	0,803	130	165	18	1
61826-2RS	490,50	0,78	130	165	18	1
61828	480,00	0,83	140	175	18	1
61828-2RS	584,00	0,83	140	175	18	1
61830	541,00	1,16	150	190	20	1
61832	725,00	1,26	160	200	20	1
61834	758,00	1,64	170	215	22	1
61836	889,00	1,77	180	225	22	1
61838	940,00	2,24	190	240	24	1

- (D) Rillenkugellager, einreihig
 (GB) Deep groove ball bearings, single row
 (F) Roulements à une rangée de billes
 (E) Rodamientos rígidos a bolas, de una hilera
 (I) Cuscinetti a sfera ad una corona
 (NL) Eenrijige groefkogellagers
 (S) Spårkullager, enradiga
 (DK) Sporkuglelejer, enradede
 (FIN) Urakuulalaakerit, yksiriviset
 (P) Rolamentos rígidos de esferas, de uma fila
 (N) Sporkulelager, enradig
 (PL) Łożyska kulkowe zwykłe
 (CZ) Kuličková ložiska, jednořadá
 (SK) Gulčkové ložiská, jednoradové
 (H) Mélyhornyú golyóscsapágy
 (BG) Едноредни сачмени лагери
 (TR) Bilyalı rulmanlar, tek sıra
 (RUS) Шарикоподшипники радиальные однорядные

FAG	Euro	≈kg	d mm	D mm	B mm	 min
61844	1 325,00	2,6	220	270	24	1
61844-M	1 749,00	3,2	220	26	24	1
61848	1 763,00	3,93	240	300	28	1
61848-M	2 109,00	4,8	240	300	28	1
61852	2 140,00	4,23	260	320	28	1
61900	19,93	0,01	10	22	6	1
61900-2Z	22,65	0,01	10	22	6	1
61900-2RSR	22,65	0,01	10	22	6	1
61901-2Z	22,60	0,012	12	24	6	1
61901-2RSR	22,60	0,012	12	24	6	1
61902	21,95	0,017	15	28	7	1
61902-2Z	25,00	0,017	15	28	7	1
61902-2RSR	25,00	0,017	15	28	7	1
61903	22,85	0,017	17	30	7	1
61903-2Z	25,55	0,019	17	30	7	1
61903-2RSR	25,55	0,019	17	30	7	1
61904	26,95	0,037	20	37	9	1
61904-2Z	30,55	0,037	20	37	9	1
61904-2RSR	30,55	0,037	20	37	9	1
61905	32,10	0,043	25	42	9	1
61905-2Z	39,70	0,043	25	42	9	1
61905-2RSR	39,70	0,043	25	42	9	1
61906-2Z	51,10	0,051	30	47	9	1
61906-2RSR	51,10	0,051	30	47	9	1
61907	59,10	0,077	35	55	10	1
61907-2RSR	69,60	0,076	35	55	10	1
61908	63,30	0,117	40	62	12	1
61908-2Z	73,80	0,11	40	62	12	1
61908-2RS	73,80	0,11	40	62	12	1
61909	73,60	0,135	45	68	12	1
61909-2Z	88,70	0,13	45	68	12	1
61909-2RS	86,20	0,135	45	68	12	1
61910	79,30	0,083	50	72	12	1
61910 2RS	101,50	0,14	50	72	12	1
61911	88,90	0,185	55	80	13	1
61911-2RSR	130,50	0,18	55	80	13	1
61912	104,50	0,206	60	85	13	1
61912-2RS	143,00	0,2	60	85	13	1
61913	112,50	0,212	65	90	13	1
61914	128,50	0,339	70	100	16	1
62200-A-2RSR	23,55	0,045	10	30	14	1
62201-A-2RSR	23,90	0,05	12	32	14	1
62202-A-2RSR	26,55	0,055	15	35	14	1
62203-A-2RSR	29,05	0,085	17	40	16	1
62204-A-2RSR	31,80	0,14	20	47	18	1
62205-A-2RSR	35,35	0,145	25	52	18	1
62206-A-2RSR	45,20	0,26	30	62	20	1
62207-A-2RSR	60,30	0,393	35	72	23	1
62208-2RSR	69,30	0,478	40	80	23	1
62209-2RSR	92,80	0,522	45	85	23	1

- (D) Rillenkugellager, einreihig
- (GB) Deep groove ball bearings, single row
- (F) Roulements à une rangée de billes
- (E) Rodamientos rígidos a bolas, de una hilera
- (I) Cuscinetti a sfera ad una corona
- (NL) Eenrijige groefkogellagers
- (S) Spårkullager, enradiga
- (DK) Sporkuglelejer, enradede
- (FIN) Urakuulalaakerit, yksiriviset
- (P) Rolamentos rígidos de esferas, de uma fila
- (N) Sporkulelager, enradig
- (PL) Łożyska kulkowe zwykłe
- (CZ) Kuličková ložiska, jednořadá
- (SK) Guľkové ložiská, jednoradové
- (H) Mélyhornyú golyóscsapágy
- (BG) Едноредни сачмени лагери
- (TR) Bilyalı rulmanlar, tek sıra
- (RUS) Шарикоподшипники радиальные однорядные

FAG	Euro	≈kg	d mm	D mm	B mm	
62210-A-2RSR	109,50	0,543	50	90	23	1
62211-2RSR	136,50	0,699	55	100	25	1
62212-2RSR	176,00	0,96	60	110	28	1
62302-A-2RSR	30,80	0,105	15	42	17	1
62303-A-2RSR	34,65	0,152	17	47	19	1
62304-A-2RSR	40,65	0,2	20	52	21	1
62305-A-2RSR	52,90	0,308	25	62	24	1
62306-2RSR	74,80	0,499	30	72	27	1
62307-A-2RSR	91,60	0,646	35	80	31	1
62308-2RSR	120,00	0,903	40	90	33	1
62310-2RSR	194,50	1,55	50	110	40	1
630/8-2RSR	26,55	0,018	8	22	11	10
63000-A-2RSR	25,90	0,026	10	26	12	10
63001-A-2RSR	25,90	0,029	12	28	12	10
63002-A-2RSR	28,10	0,041	15	32	13	1
63003-A-2RSR	30,05	0,051	17	35	14	1
63004-A-2RSR	32,40	0,086	20	42	16	1
63005-A-2RSR	33,40	0,101	25	47	16	1
63006-A-2RSR	46,40	0,162	30	55	19	1
63007-A-2RSR	49,10	0,207	35	62	20	1
63008-2RSR	58,50	0,259	40	68	21	1
S6000-2RSR	28,10	0,02	10	26	8	10
S6001-2RSR	29,60	0,023	12	28	8	10
S6002-2RSR	36,25	0,031	15	32	9	1
S6003-2RSR	42,85	0,04	17	35	10	1
S6004-2RSR	56,00	0,067	20	42	12	1
S6005-2RSR	70,80	0,084	25	47	12	1
S6006-2RSR	105,50	0,118	30	55	13	1
S6007-2RSR	158,50	0,163	35	62	14	1
S6008-2RSR	238,00	0,195	40	68	15	1
S6009-2RSR	374,00	0,244	45	75	16	1
S6010-2RSR	440,50	0,271	50	80	16	1
S6200-2RSR	35,30	0,034	10	30	9	1
S6201-2RSR	34,55	0,04	12	32	10	1
S6202-2RSR	37,85	0,045	15	35	11	1
S6203-2RSR	44,35	0,067	17	40	12	1
S6204-2RSR	59,20	0,109	20	47	14	1
S6205-2RSR	69,20	0,133	25	52	15	1
S6206-2RSR	119,50	0,211	30	62	16	1
S6207-2RSR	198,00	0,303	35	72	17	1
S6208-2RSR	243,00	0,384	40	80	18	1